

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Ensaaios Dielétricos em Seccionadores de Média Tensão

Carlos Eduardo Silva Garrido

VERSÃO FINAL

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor António Machado e Moura

28 de fevereiro de 2018

Resumo

A presente dissertação tem como objetivos principais a análise de um seccionador cedido pela EFACEC, através da realização dos ensaios passíveis de serem efetuados tendo em consideração as regras normativas e as funcionalidades presentes no Laboratório de Alta Tensão (LAT) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, aferindo se o seu funcionamento pode ser feito com rigor e segurança. Inicialmente é feito um estudo detalhado sobre seccionadores, descrevendo o conceito geral dos seccionadores de média tensão, sendo dado ênfase à sua constituição, funcionamento, contexto histórico, características elétricas, instalação, isolamento, tipos de seccionador, qualidade e segurança e avarias. Será ainda, apresentado o LAT, descrevendo os equipamentos que o constituem, a sua disposição e princípios de funcionamento. Por fim, é feita uma abordagem às normas internacionais que ditam as condições de ensaio, esquemas de montagem e procedimentos, sendo posteriormente descritos os esforços efetuados para cumprir todos os requisitos, uma calibração do equipamento do LAT recorrendo ao espinterómetro de esferas, bem como a sequência de testes realizados ao objeto em estudo, apresentando, finalmente, os resultados, verificando se correspondem aos valores apropriados.

Palavras-chave: Seccionadores, Ensaios, Laboratório, Alta Tensão, Procedimentos

Abstract

The main objective of this dissertation is the analysis of a switchgear provided by EFACEC, through the realization of the tests that can be performed taking into account the normative rules and functionalities present in the High Voltage Laboratory (LAT) of the Faculty of Engineering of the University of Porto, assessing if its operation can be done with precision and security. Initially, a detailed study is made on switchgears, describing the general concept behind medium voltage switchgears, with emphasis on their constitution, operation, historical context, electrical characteristics, installation, insulation, types of disconnecter, quality and safety, and malfunctions. It is also presented the LAT, describing the equipments that constitute it, its disposition and principles of operation. Finally, an approach is taken to the international standards that dictate the conditions of test, assembly schemes and procedures, being described later the efforts made to fulfill all the requirements, we calibrate the measuring equipment with the help of a ball thickness gauge, as well as the sequence of tests carried out to the object being studied, presenting finally the results, verifying if they correspond to the appropriate values.

Keyword: Switchgears, Tests, Laboratory, High Voltage, Procedures

Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero agradecer ao Professor Doutor António Machado e Moura, pela oportunidade que me deu de trabalhar no LAT e pela confiança depositada em mim ao longo do semestre. Da mesma forma, agradeço ao Eng^o Fábio Branco e ao Eng^o Francisco Gomes pelos ensinamentos e disponibilidade demonstrada ao longo do semestre, tendo esta tese sido impossível desenvolver sem o vosso apoio.

Deixo também uma palavra de apreço ao DEQ e ao Eng^o Nuno Guerreiro pela colaboração no desenvolvimento desta dissertação.

Agradeço aos meus amigos José Pedro Paulos, João Teixeira, Gonçalo Dias, João Rocha, André Arêde, Pedro Pinto e Gonçalo Fonseca que, apesar de alguns deles já não estarem pela FEUP, foi com eles que consegui ultrapassar alguns dos anos difíceis que já tive e que me deram força para não desistir do curso.

Quero também agradecer aos meus "amigos de ambiente" José Neves, Jorge Dias, Catarina Pinto e Glória Gonçalves, que sempre me apoiaram em que precisei ao longo destes anos.

Não posso deixar de parte os meus amigos do BEST Porto, que me permitiram desenvolver não só imensas capacidades que não sabia que tinha, como me mostraram mais do mundo. Sem eles não tinha conseguido terminar o curso, muito menos desenvolver métodos de organização que foram essenciais ao desenvolvimento desta tese.

Agradeço à Catarina Lourenço, por todo o apoio que me deu, não só no desenvolvimento desta dissertação, como durante todo o tempo que me conhece. Obrigado.

Finalmente, agradeço à minha família, pela confiança que depositaram em mim, por quererem sempre que desse o meu máximo, sem a qual não seria possível concluir esta ou qualquer outra etapa da minha vida.

Carlos Garrido

“I like to think of ideas as potential energy. They’re really wonderful, but nothing will happen until we risk putting them into action.”

Mae Jemison

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos e Motivação	2
1.3	Estrutura da Dissertação	2
2	Seccionadores em Redes de Média Tensão e Laboratório de Alta Tensão	3
2.1	Conceito Geral	3
2.1.1	Constituição	4
2.1.2	Funcionamento	5
2.1.3	Contexto Histórico	5
2.1.4	Caraterísticas Elétricas	6
2.1.5	Instalação	6
2.1.6	Isolamento	7
2.1.7	Tipos de Seccionador	8
2.1.7.1	Seccionador Semi-Pantógrafo	8
2.1.7.2	Seccionador Horizontal	8
2.1.7.3	Seccionador Vertical	9
2.1.8	Qualidade e Segurança	9
2.1.9	Avarias	9
2.2	Laboratório de Alta Tensão	10
2.2.1	Sala de Observação	11
2.2.2	Sala de Ensaios	11
2.2.3	Sala de Comando	18
2.2.4	Medidas de Segurança	20
2.2.4.1	Medidas Passivas	20
2.2.4.2	Medidas Ativas	20
2.3	Conclusão	21
3	Ensaios	23
3.1	Introdução	23
3.2	Ensaios ao Choque	23
3.2.1	Método Up and Down	26
3.3	Ensaios à Frequência Industrial	26
3.3.1	Ensaios a Seco	28
3.3.2	Ensaios Sob Chuva	29
3.4	Correções Atmosféricas em Ensaios	30
3.4.1	Aplicação dos Fatores de Correção	31
3.4.2	Parâmetros de Humidade Atmosférica	35

4	Implementação de Ensaios	37
4.1	Preparação da Zona de Ensaios	37
4.1.1	Preparação da Área de Ensaios à Chuva	37
4.1.2	Montagem do Seccionador	39
4.1.2.1	Aspersores	41
4.2	Conclusão	42
5	Calibração com Espinterómetro de Esferas do Equipamento de Ensaio	45
5.1	Calibração	45
5.1.1	Frequência Industrial	47
5.1.1.1	Ensaio com Distância Entre Esferas de 24 mm	47
5.1.1.2	Ensaio com Distância Entre Esferas de 60 mm	47
5.1.1.3	Ensaio com Distância Entre Esferas de 150 mm	48
5.1.2	Choque	49
5.1.2.1	Ensaio com Polaridade Positiva com Distância Entre Esferas de 60 mm	49
5.1.2.2	Ensaio com Polaridade Positiva com Distância Entre Esferas de 100 mm	50
5.1.2.3	Ensaio com Polaridade Positiva com Distância Entre Esferas de 140 mm	50
5.1.2.4	Ensaio com Polaridade Negativa com Distância Entre Esferas de 60 mm	51
5.1.2.5	Ensaio com Polaridade Negativa com Distância Entre Esferas de 100 mm	52
5.1.2.6	Ensaio com Polaridade Negativa com Distância Entre Esferas de 140 mm	53
5.2	Conclusão	54
6	Ensaios e Análise dos Procedimentos	55
6.1	Introdução	55
6.1.1	Características do Seccionador	57
6.1.2	Fase-Fase	57
6.1.3	Fase-Terra	58
6.1.4	Seccionamento	58
6.2	Ensaios à Frequência Industrial - Ensaios à Chuva	59
6.2.1	Fase-Fase	59
6.2.2	Fase-Terra	60
6.2.3	Seccionamento	62
6.3	Ensaios à Frequência Industrial - Ensaios a Seco	63
6.3.1	Seccionamento	63
6.3.2	Fase-Terra	64
6.3.3	Fase-Fase	65
6.4	Ensaios ao Choque	66
6.4.1	Fase-Fase	67
6.4.2	Fase-Terra	69
6.4.3	Seccionamento	72
6.5	Ensaios à Frequência Industrial - Contornamento	75
6.5.1	Fase-Fase	75
6.5.2	Fase-Terra	76

6.5.3	Seccionamento	78
6.6	Ensaio ao Choque - Contornamento	79
6.6.1	Fase-Fase	80
6.6.2	Fase-Terra	81
6.6.3	Seccionamento	84
6.7	Conclusão	87
7	Considerações Finais	89
7.1	Conclusões Finais	89
7.2	Satisfação dos Objetivos	89
7.3	Trabalhos Futuros	90
A	Resultados dos Ensaio à Frequência Industrial a Seco	91
B	Resultados dos Ensaio à Frequência Industrial à Chuva	95
C	Resultados dos Ensaio ao Choque	99
D	Resultados dos Ensaio à Frequência Industrial - Contornamento	111
E	Resultados dos Ensaio ao Choque - Contornamento	113
	Referências	119

Lista de Figuras

2.1	Exemplo de um seccionador	4
2.2	Modelo de seccionador com (1) facas, (2) maxilas, (3) suportes e o (4) chassis metálico	5
2.3	Seccionador de facas antigo	6
2.4	Subestação ao ar livre	7
2.5	Imagem ilustrativa dos diferentes seccionadores	8
2.6	Sala de controlo de uma rede elétrica	10
2.7	Imagem do piso 1 (à esquerda) e do piso 0 (à direita) do edifício J	11
2.8	Esquema da sala de testes do LAT	12
2.9	Panorâmica da sala de ensaios	12
2.10	Gerador de Marx do tipo SGS 1200kV/36kJ	13
2.11	Retificador do carregamento tipo LGR 100-15	13
2.12	Divisor de tensão do tipo CR 1200kV	14
2.13	Transformador de alta tensão 600 kV	15
2.14	Divisor de tensão CW 600	16
2.15	Espinterómetro de esferas vertical	16
2.16	Reservatório de água	17
2.17	Aspersores	18
2.18	Panorâmica da sala de comando	18
2.19	Módulo de controlo	19
2.20	Sistema DIAS (Digital Impulse Analyser System) 730	19
2.21	Regulador elevador (à esquerda) e unidade de controlo e medida (à direita)	20
2.22	Quadro de controlo do LAT	21
3.1	Onda de impulso completa	24
3.2	Onda de impulso atmosférico cortada na frente e determinação do tempo de corte	25
3.3	Ligação entre o gerador de Marx, divisor de corrente e seccionadores a serem testados	26
3.4	Exemplo de uma onda típica de uma descarga completa	27
3.5	Ligação entre o transformador, divisor de tensão e seccionadores a serem testados	28
3.6	Relação entre D e U	29
3.7	Coletor de calibração do ensaio à chuva	29
3.8	Gráfico que ilustra os valores de k	33
3.9	Gráfico que ilustra os valores de m e w em função de g	34
3.10	Gráfico que ilustra o valor de m em função de g	34
3.11	Gráfico que ilustra o valor w em função de g	35
3.12	Relação entre a temperatura ambiente e a humidade absoluta do ar	36

4.1	Montagem dos apoios	38
4.2	Montagem dos apoios às cortinas	38
4.3	Medição da condutividade de uma amostra de água	39
4.4	Seccionador dentro da caixa de madeira	39
4.5	Bases onde assenta a estrutura do equipamento ligadas à terra	40
4.6	Distância entre o ponto a ser alimentado e o ponto condutor mais próximo	40
4.7	Nomenclatura dos pólos	41
4.8	Torneira de drenagem do reservatório	41
4.9	Exemplo de uma proposta de relatório de replicabilidade	43
5.1	Limites de segurança do espinterómetro	46
5.2	Resultados do ensaio(+) com espaçamento 60 mm	49
5.3	Resultados do ensaio (+) com espaçamento de 100 mm	50
5.4	Resultados do ensaio (+) com espaçamento de 140 mm	51
5.5	Resultados do ensaio (-) com espaçamento de 60 mm	52
5.6	Resultados do ensaio (-) com espaçamento de 100 mm	53
5.7	Resultados do ensaio (-) com espaçamento de 140 mm	54
6.1	Par de pólos fechado (à esquerda) e par de pólos aberto (à direita)	55
6.2	Esquema de um seccionador aberto e fechado	56
6.3	Chapa de características dos seccionadores	57
6.4	Exemplo de uma ligação fase-fase	57
6.5	Exemplo de uma ligação fase-terra	58
6.6	Exemplo de uma ligação num ensaio ao seccionamento	58
6.7	Calibração do ensaio à chuva	59
6.8	Esquema de ensaio à frequência industrial à chuva numa ligação fase-fase	60
6.9	Esquema de ensaio à frequência industrial à chuva numa ligação fase-terra	61
6.10	Esquema de ensaio à frequência industrial à chuva numa ligação de seccionamento	62
6.11	Esquema de ensaio à frequência industrial numa ligação fase-terra	64
6.12	Esquema de ensaio à frequência industrial numa ligação fase-terra	65
6.13	Esquema de ensaio à frequência industrial numa ligação fase-fase	66
6.14	Esquema de ensaio ao choque frequência industrial numa ligação fase-fase	67
6.15	Display no ecrã do DIAS do ensaio fase-fase - (B-b) na sexta repetição	68
6.16	Esquema de ensaio ao choque numa ligação fase-terra	70
6.17	Esquema de ensaio ao choque numa ligação de seccionamento	73
6.18	Resultados do ensaio (+) fase-fase do par A-a	80
6.19	Representação gráfica dos resultados do ensaio fase-fase do par de pólos A-a com polaridade negativa	81
6.20	Representação gráfica dos resultados do ensaio fase-fase do par de pólos A-a com polaridade negativa	82
6.21	Resultados do ensaio (+) fase-terra do pólo A	82
6.22	Resultados do ensaio (+) fase-terra do pólo a	83
6.23	Resultados do ensaio (-) fase-terra do pólo a	84
6.24	Resultados do ensaio ao seccionamento (+) do pólo a	85
6.25	Resultados do ensaio ao seccionamento (-) do pólo a	85
6.26	Resultados do ensaio ao seccionamento (-) do pólo A	86
6.27	Resultados do ensaio ao seccionamento (+) do pólo A	87

Lista de Tabelas

3.1	Condições de precipitação para os procedimentos standard	30
5.1	Condições atmosféricas para calibração à frequência industrial para 24 mm . . .	47
5.2	Resultados da calibração à frequência industrial para 24 mm	47
5.3	Condições atmosféricas para a calibração à frequência industrial para 60 mm . .	48
5.4	Resultados da calibração à frequência industrial para 60 mm	48
5.5	Condições atmosféricas para a calibração à frequência industrial para 150 mm . .	48
5.6	Resultados da calibração à frequência industrial para 150 mm	48
5.7	Condições atmosféricas na calibração ao choque (+) para 60 mm	49
5.8	Condições atmosféricas para a calibração ao choque (+) para 100mm	50
5.9	Condições atmosféricas para a calibração ao choque (+) para 140 mm	51
5.10	Condições atmosféricas para o ensaio de calibração ao choque (-) para 60 mm . .	51
5.11	Condições atmosféricas para o ensaio de calibração ao choque (-) para 100mm .	52
5.12	Condições atmosféricas para o ensaio de calibração ao choque (-) para 140mm .	53
6.1	Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, à chuva numa ligação fase-fase	59
6.2	Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, à chuva numa ligação fase-terra	61
6.3	Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, à chuva numa ligação de seccionamento	63
6.4	Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, a seco numa ligação de seccionamento	63
6.5	Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, a seco numa ligação fase-terra	64
6.6	Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, a seco numa ligação fase-fase	67
6.7	Média do tempo de frente, cauda e tensão em fase-fase (+) A-a	68
6.8	Média do tempo de frente, cauda e tensão em fase-fase (-) A-a	68
6.9	Média do tempo de frente, cauda e tensão em fase-fase (-) B-b	68
6.10	Média do tempo de frente, cauda e tensão em fase-fase (+) B-b	69
6.11	Condições atmosféricas pré ensaio ao choque, numa ligação fase-terra ao pólo b .	69
6.12	Média do tempo de frente, cauda e tensão em fase-terra (+) b	69
6.13	Média do tempo de frente, cauda e tensão em fase-terra (-) b	70
6.14	Média do tempo de frente, cauda e tensão em fase-terra (-) B	71
6.15	Média do tempo de frente, cauda e tensão em fase-terra (+) B	71
6.16	Média do tempo de frente, cauda e tensão em fase-terra (+) A	71
6.17	Média do tempo de frente, cauda e tensão em fase-terra (-) A	71

6.18 Média do tempo de frente, cauda e tensão em fase-terra (-) a	72
6.19 Média do tempo de frente, cauda e tensão em fase-terra (+) a	72
6.20 Condições atmosféricas pré ensaio ao choque, numa ligação seccionamento . . .	72
6.21 Média do tempo de frente, cauda e tensão em seccionamento (+) a	73
6.22 Média do tempo de frente, cauda e tensão em seccionamento (-) a	74
6.23 Média do tempo de frente, cauda e tensão em seccionamento (-) A	74
6.24 Média do tempo de frente, cauda e tensão em seccionamento (+) A	74
6.25 Média do tempo de frente, cauda e tensão em seccionamento (+) B	74
6.26 Média do tempo de frente, cauda e tensão em seccionamento (-) B	75
6.27 Média do tempo de frente, cauda e tensão em seccionamento (-) b	75
6.28 Média do tempo de frente, cauda e tensão em seccionamento (+) b	75
6.29 Condições atmosféricas pré ensaio à frequência industrial, numa ligação fase-fase	76
6.30 Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, numa ligação fase-fase	76
6.31 Valores de tensão média corrigidos	76
6.32 Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, numa ligação fase-terra	77
6.33 Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, numa ligação fase-terra	77
6.34 Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, numa ligação fase-terra	77
6.35 Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, numa ligação fase-terra	77
6.36 Valores de tensão média corrigidos	78
6.37 Condições atmosféricas pré ensaio à frequência industrial, ligação de secciona- mento A	78
6.38 Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, numa ligação de seccionamento	78
6.39 Condições atmosféricas pré ensaio à frequência industrial, ligação seccionamento ao pólo B	79
6.40 Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, ligação de secciona- mento no pólo b	79
6.41 Valores de tensão média corrigidos	79
6.42 Condições atmosféricas pré ensaio ao choque, numa ligação fase-fase ao par de pólos A-a	80
6.43 Condições atmosféricas pré ensaio ao choque, numa ligação fase-fase ao par de pólos A-a	80
6.44 Valores de tensão média corrigidos	81
6.45 Condições atmosféricas pré ensaio ao choque, numa ligação fase-terra ao pólo A	81
6.46 Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, em condições de chuva numa ligação fase-fase	82
6.47 Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, em condições de chuva numa ligação fase-fase	83
6.48 Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, em condições de chuva numa ligação fase-fase	83
6.49 Valores de tensão média corrigidos	84
6.50 Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, em condições de chuva numa ligação fase-fase	84
6.51 Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, em condições de chuva numa ligação fase-fase	85
6.52 Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, em condições de chuva numa ligação fase-fase	86

6.53	Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, em condições de chuva numa ligação fase-fase	86
6.54	Valores de tensão média corrigidos	87

Abreviaturas e Símbolos

δ	densidade relativa do ar
$^{\circ}\text{C}$	graus celcius
μF	micro farad
μs	micro segundo
$\mu\text{S}/\text{cm}^2$	micro siemens por cm quadrado
Ω	ohm
%	percentagem
ρF	pico farad
(-)	polaridade negativa
(+)	polaridade positiva
(A)	altura da esfera carregada
A	ampere
L'	caminho mais curto de descarga em metros
cm	centímetro
D	diâmetro da esfera
DIAS	Digital Impulse Analiser System ou Sistema Digital de Análise de Impulso
B	distância até objetos exteriores
S	espaço entre esferas
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
k_1	fator de correção da densidade do ar
k_2	fator de correção da humidade do ar
K_t	fator de correção de referência
g/m^3	gramas por metro cúbico
hPA	heca pascais
Hz	hertz
SF_6	hexafluoreto de enxofre
h_0	humidade absoluta de referência
h	humidade medida
R	humidade relativa em percentagem
MT	média tensão
mbar	milíbar
mm/min	milímetro por minuto
LAT	Laboratório de Alta Tensão
L	litro
O1	origem virtual
p_0	pressão absoluta de referência
p	pressão medida
kJ	quilojoule
kV	quilovolts
kVA	quilovolts por ampere

SHCR	seccionador horizontal central rotativo
SHD	seccionador horizontal duplo
t	temperatura medida
t_0	temperatura de referência
T2	tempo de cauda
T_c	tempo de corte
T1	tempo de subida
U	tensão medida
U_0	tensão de referência
U_{50}	valor de 50% da tensão de descarga disruptiva
VP	valor de pico
VL	valor lido

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

A partir do final do século XIX, a humanidade entrou num período acelerado de evolução tecnológica baseado sobretudo na utilização de eletricidade. Esta inovação estendeu-se até aos dias de hoje e baseia-se no uso desse recurso, sendo a sua distribuição social considerada o maior feito do século XX [1].

A eletricidade providenciou condições para desenvolver a sua população, criar centros metropolitanos, revolucionar métodos de transporte, aumentar dramaticamente o nível e qualidade dos cuidados médicos e criar um vasto sistema de comunicações eletrónicas. Apoiou o aumento da qualidade de vida, o bem-estar económico e redução da poluição. Deste modo, é possível compreender a necessidade de expandir e melhorar a fiabilidade, qualidade e segurança da distribuição elétrica. De modo a melhorá-la, os equipamentos que a constituem têm de ter uma qualidade elevada, uma vez que esta é necessária a todos os desenvolvimentos supra-referidos. Como tal, é do maior interesse, não só dos utentes da rede elétrica como das entidades que efetivamente investem em equipamento, ter referências e garantias da qualidade do mesmo. Para os fornecedores poderem dar garantias aos clientes de que o seu equipamento tem a qualidade adequada, são efetuados ensaios. Deste modo, os fornecedores podem adquirir a informação necessária para decidir se o processo de conceção do produto deve ou não sofrer alterações. A venda do equipamento elétrico depende das suas características, tornando necessário os ensaios laboratoriais independentes, garantindo a integridade dos resultados.

O Laboratório de Alta Tensão realiza ensaios que corroboram (ou não) os resultados dos fornecedores, procedendo uma análise independente ao equipamento. Os seccionadores são um dos equipamentos utilizados no transporte e distribuição de energia elétrica. Têm a capacidade para interromper um circuito elétrico, tendo em conta algumas condicionantes, sendo aparelhos de proteção, para que as equipas de manutenção trabalhem no circuito em segurança [2].

1.2 Objetivos e Motivação

Esta dissertação incide no estudo e procedimentos de ensaio de seccionadores e nos ensaios efetuados no Laboratório de Alta Tensão da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, tendo por objetivo dotar o LAT com as valências necessárias para realizar os respetivos ensaios, nomeadamente ao choque e à frequência industrial (a seco/à chuva), procurando adequar o seu funcionamento a novas funcionalidades. Um dos pontos de foco desta tese são os procedimentos dos ensaios referidos anteriormente, de acordo com as normas em vigor, sendo um dos objetivos a capacidade de dotar o LAT com estes vários tipos de ensaio, com destaque para o ensaio à chuva, recorrendo ao equipamento de simulação de chuva. Isto permite que empresas possam recorrer ao LAT para poderem efetuar estes ensaios, além disso tenta-se também promover a parceria com a EFACEC, procurando que as boas relações entre as duas entidades se mantenham. É importante referir que a capacidade de abrir oportunidade de novos ensaios disponíveis no LAT não se destina somente à EFACEC mas a todas as empresas que tenham intenção de colaborar com o LAT.

Uma grande motivação no desenvolvimento desta tese foi a vontade de aprender mais sobre equipamentos de Alta Tensão aliada ao facto do LAT ser o único laboratório afeito a uma faculdade, sendo esta uma das únicas oportunidades de trabalhar com estas matérias num contexto académico.

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturado em sete capítulos, sendo a leitura ordenada destes essencial para a compreensão integral dos temas abordados. O Capítulo 1 contextualiza o tema abordado no panorama atual, refere os objetivos que se pretendem atingir com a presente dissertação e explicam a estrutura da mesma. O Capítulo 2 revê e contextualiza o equipamento estudado, para além de descrever brevemente o Laboratório de Alta Tensão da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. O Capítulo 3 descreve os ensaios a realizar, bem como especificações e outros métodos utilizados. O Capítulo 4 resume o processo de montagem dos equipamentos necessários aos ensaios. O Capítulo 5 aborda o processo de calibração do equipamento e estuda os resultados obtidos na calibração. No Capítulo 6 são apresentados os resultados dos ensaios e é feita uma análise dos mesmos. Por fim, no Capítulo 7 propuseram-se trabalhos futuros e analisou-se o cumprimento dos objetivos propostos. O objetivo desta estruturação é o leitor começar de uma perspetiva generalista e ir aos poucos aprofundando o seu conhecimento, começando por ficar inteirado do equipamento em estudo e do local onde ele será estudado, de seguida os métodos e as normas internacionalmente estabelecidas a que iremos recorrer. Após ter estas bases de conhecimento, é abordada a montagem em si, tendo em conta o espaço e o equipamento a tratar. Antes de serem iniciados os ensaios ao equipamento, são efetuados ensaios de calibração ao equipamento de medição, encontrando-se finalmente as condições reunidas para o ensaio. Após a apresentação e tratamento dos resultados é realizada uma conclusão geral ao trabalho desenvolvido e é verificada a satisfação dos objetivos, bem como possíveis trabalhos futuros.

Capítulo 2

Seccionadores em Redes de Média Tensão e Laboratório de Alta Tensão

O atual capítulo procederá a uma análise dos seccionadores atualmente utilizados, tendo como conteúdos uma apresentação do conceito geral, constituição, funcionamento, contexto histórico, instalação, tipos de seccionador e qualidade e segurança, bem como a uma apresentação do LAT onde foi desenvolvida a presente dissertação. Estas duas temáticas são essenciais no desenvolvimento desta dissertação, de modo a ser possível conhecer melhor o equipamento disponível, bem como o local e as ferramentas de ensaio.

2.1 Conceito Geral

Num sistema de energia elétrica, o seccionador é um equipamento de manobra que é utilizado para controlar, proteger e isolar equipamentos elétricos, de acordo com as condições de funcionamento e segurança estabelecidas. A função principal deste equipamento é garantir a segurança e um isolamento elétrico visível em zonas da rede na qual seja necessário a intervenção humana em situações como obras de manutenção de equipamento ou substituição do mesmo na rede, maximizando a exploração da mesma.



Figura 2.1: Exemplo de um seccionador

O seccionador, ao ser aberto, faz com que os pólos estejam rodeados por um isolante que, para o caso em estudo, é o ar. Quanto maior a distância entre os condutores maior quantidade de ar conseguimos ter entre os dois equipamentos condutores tornando, assim, possível aguentar maiores diferenciais de tensão entre os dois, sem que haja arco elétrico.

Um equívoco comum, é assumir que os seccionadores, por serem aparelhos de proteção e manobra, têm poder de corte. Os seccionadores não possuem poder de corte, aliás a sua manobra (abertura ou fecho dos mesmos) só pode ser feita recorrendo primeiro ao acionamento de um aparelho com poder de corte, como o disjuntor, fazendo com que a corrente na linha seja desprezável, evitando assim variação nos valores de tensão entre os terminais de cada um dos pólos. Só após destas condições serem verificadas é que podemos recorrer à abertura ou fecho de um seccionador no local. Este equipamento tem como foco a sua utilização num sistema de energia elétrica de alta/média tensão como dispositivo de comutação e proteção [3] [4] [5] [6] [7] [8] .

2.1.1 Constituição

Na sua conceção são normalmente utilizadas peças em cobre e aço, sendo revestidas por um *coating* isolante quando conveniente. A qualidade é muito importante no processo de fabrico, pelo que defeitos devem ser detetados mesmo antes do equipamento sair da fábrica, sendo estes testados de modo a poderem ser enviados com a qualidade desejada.

De um modo geral, os seccionadores são constituídos por: facas, maxilas, suportes e o chassis metálico. Como podemos verificar pelo modelo do seccionador da Figura 2.2, as facas estão abertas. Quando queremos ter corrente na linha temos ter as facas fechadas. Os suportes encontram-se entre as partes condutoras anteriormente mencionadas e o chassis metálico.

O pólo encaixado é designado de pólo fêmea e o que encaixa é designado de pólo macho [9] [10] [11] [12] [13].

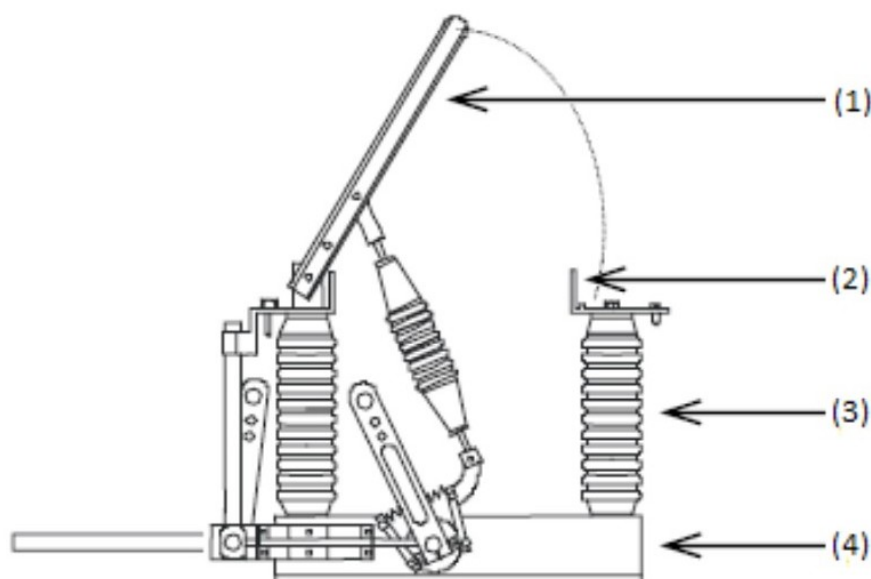


Figura 2.2: Modelo de seccionador com (1) facas, (2) maxilas, (3) suportes e o (4) chassis metálico

2.1.2 Funcionamento

O seccionador desempenha um papel vital na rede de sistemas de energia, desde a geração, passando pela transmissão e até ao fim da distribuição. Normalmente o procedimento envolve a abertura física dos pólos através das facas.

O dispositivo de interrupção de corrente (equipamento de corte) ou o dispositivo de comutação é designado por disjuntor para proteção contra defeitos. O disjuntor pode ser operado manualmente quando necessário, atuando automaticamente em situações de sobrecarga, curto-circuito ou quaisquer outras falhas detetadas no sistema. O disjuntor deteta a condição defeituosa do sistema através do relé de proteção, sendo este acionado por sinal de defeito, normalmente vindo do transformador de corrente ou transformador de tensão. Após a ação do disjuntor aí sim podemos abrir os seccionadores [14] [15] [16].

2.1.3 Contexto Histórico

Com a produção e distribuição de energia elétrica, surgiram os seccionadores. Os primeiros modelos eram muito primitivos e as primeiras centrais elétricas usavam todas as componentes simplesmente fixadas em painéis (normalmente de madeira). Assim, acabamos por ficar com o sistema montado em painéis isolantes com os instrumentos de interrupção e medida, com o mostrador encaixado na parte da frente e os fios na parte de trás. Por razões de proteção contra incêndios, evitou-se a utilização de painéis de madeira e passou-se a recorrer ao uso de ardósia e mármore. Com o aumento da necessidade energética, os níveis de potência e as tensões aumentaram, tornando obsoleta a abertura dos interruptores operados manualmente.

Por esta altura surgiram equipamentos com base no óleo permitindo que a energia do arco de contorno fosse contida e controlada com segurança. Seccionadores de alta tensão foram inventados

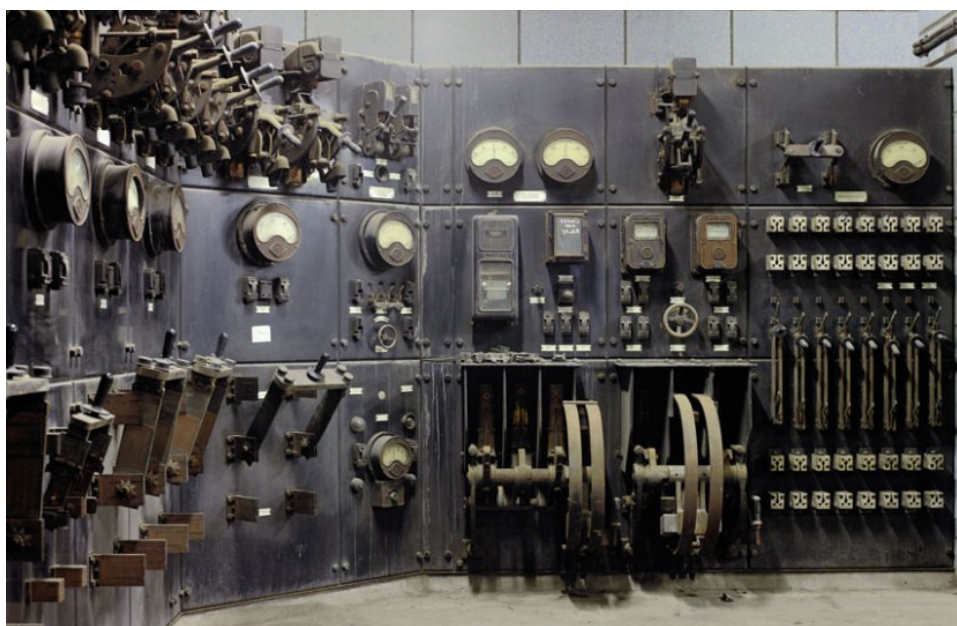


Figura 2.3: Seccionador de facas antigo

no final do século XIX para operar motores e outras máquinas elétricas tendo sido melhorada ao longo do tempo [2] [17] [18] [19] [20] [21] [22] [23] [24] .

2.1.4 Caraterísticas Elétricas

Nos seccionadores, devem ser sempre tidos em conta valores como a tensão e correntes nominais, tensão estipulada à frequência industrial e à onda de choque, distância do isolamento/distância entre condutores, tipo de isolamento, tensão de serviço, corrente de curto-circuito e duração máxima do mesmo.

Como anteriormente mencionado, estes equipamentos têm uma maior prevalência em linhas de Média e Alta Tensão. Por norma, devido aos níveis de tensão usuais em Portugal Continental, é mais comum encontrarmos seccionadores dimensionados para suportar tensões de 12, 17,5 e 36 kV. Estes valores são flutuantes, dependendo de fatores como o número de condutores por faca e dimensão e tipo de isolamento entre pólos.

O tipo de isolamento entre pólos é relevante devido às suas linhas de fuga, especialmente quando falamos de ambiente poluídos. Num ambiente poluído o valor mínimo do comprimento do isolador é dado de acordo com a classificação da norma [25], de acordo com o nível de poluição [9] [26] .

2.1.5 Instalação

Os seccionadores de média tensão podem tanto ser instalados no interior como no exterior. Seccionadores interiores costumam ser utilizados em postos de transformação para alimentar indústrias. Seccionadores no exterior recorrem a postes (de betão ou metal) para serem instalados,

estes seccionadores são instalados em postos de transformação com potências que chegam até aos 100 kVA. São normalmente equipamentos mais robustos que os seccionadores interiores, devido ao facto de os seccionadores instalados no exterior terem de estar preparados para aguentar condições naturais adversas, desde situações climáticas a depósitos animais.

No interior, as condições climáticas encontram-se controladas, não sendo necessário o nível de robustez dos instalados no exterior. Podem estar localizados num edifício, com disjuntores de média tensão para circuitos de distribuição, juntamente com equipamentos de medição, controlo e proteção. Para aplicações industriais, uma linha de transformador e seccionador pode ser combinada. Seccionadores de baixa tensão podem ser inteiramente incluídos num edifício, contudo para voltagens elevadas (acima de 66 kV), seccionadores são tipicamente montados no exterior e isolados por ar apesar de isto necessitar de uma quantidade elevada de espaço. Quando são seccio-



Figura 2.4: Subestação ao ar livre

nadores isolados a gás, economizam espaço quando comparados com os isolados a ar, tendo como contrapartida um custo superior. Seccionadores isolados a óleo apresentam um potencial risco de derrame, sendo aconselhada que a sua localização tenha em conta essa possibilidade. Interruptores podem ser operados manualmente ou ter unidades de motor para permitir o controlo remoto [27].

2.1.6 Isolamento

O isolamento deve ser estabelecido entre a face e a respetiva maxila, bem como entre pares de pólos. A distância a que cada um destes equipamentos deve estar para ficarem isolados entre si, chama-se "distância de isolamento", devendo ser medida entre os pontos mais próximos.

2.1.7 Tipos de Seccionador

Neste capítulo iremos abordar alguns tipos de seccionador. Cada um destes apresenta-se como a melhor solução para várias situações. Na seguinte imagem podemos ver três tipos de seccionadores, nomeadamente Seccionador Semi-Pantógrafo (à esquerda), Seccionador Horizontal de Abertura Central (ao centro) e Seccionador Vertical (à direita) [28] [9] [29] .



Figura 2.5: Imagem ilustrativa dos diferentes seccionadores

2.1.7.1 Seccionador Semi-Pantógrafo

Seccionadores do tipo semi-pantógrafo têm pólos separados para poderem ser melhor instalados no exterior. A ligação e abertura são feitas através da ligação de um braço articulado. É um seccionador de conceção simples e de montagem fácil, sendo o braço articulado um dispositivo com muita resistência mecânica, podendo sustentar as solicitações eletrodinâmicas de curto-circuito. Possui capacidade de funcionar em condições atmosféricas adversas nomeadamente com gelo [28] .

2.1.7.2 Seccionador Horizontal

Estes seccionadores são constituídos por duas ou três colunas rotativas. A abertura pode ser central (seccionador horizontal duplo - SHD) ou de dupla abertura lateral (seccionador horizontal central rotativo - SHCR). No caso do seccionador em estudo, o fecho e abertura são feitos através da rotação dos braços de contactos móveis instalados num plano horizontal, sendo a disposição dos pólos separada, permitindo uma fácil instalação e manutenção no exterior. Normalmente são equipamentos que estão dotados de comando manual ou motorizado, local ou à distância. Estes equipamentos são bastante resistentes, resistindo a efeitos sísmicos e a funcionando em condições de gelo [28].

2.1.7.3 Seccionador Vertical

Seccionadores deste tipo têm uma abertura vertical rotativa que permite instalação no exterior. Este equipamento consiste em três isoladores, sendo dois deles fixos. Como é possível ver na Figura 2.5, este tipo de seccionador é dotado de uma biela de manobra, cuja abertura/fecho é realizada recorrendo a um comando motorizado, havendo também a opção de utilização do comando manual. Esta abertura/fecho é realizada através da rotação ou translação das respetivas bielhas de manobra, bem como dos respetivos mecanismos que transmitem os movimentos de modo a concluir a transição entre a posição de aberto e fechado. Estes seccionadores têm resistência a fenómenos sísmicos e são capazes de operar sob condições atmosféricas adversas, nomeadamente gelo [28].

2.1.8 Qualidade e Segurança

Quando estes equipamentos não respeitam os padrões de qualidade e segurança desejados, podem causar danos materiais severos, bem como morte de pessoas (no pior dos casos). Assim, segurança deve ser a prioridade número um. Para garantir um funcionamento seguro dos seccionadores, existem situações já predefinidas para a ativação do mesmo. Esquemas complexos são possíveis, por exemplo, se apenas for permitido a uma das duas fontes de fornecimento estar ligada num determinado momento, o esquema de bloqueio pode obrigar à abertura do primeiro interruptor, libertando a chave que permite fechar o segundo interruptor.

Seccionadores interiores também devem ser testados. Estes testes são importantes para assegurar a segurança do utilizador ao trabalhar com correntes elevadas. Normalmente, seccionadores são inspecionados recorrendo a uma análise térmica para aferir o estado do sistema e prever falhas antes de elas ocorrerem. Outros métodos incluem a descarga parcial (utilizando equipamentos de teste fixos ou portáteis) e testes de emissão acústica (recorrendo a transdutores implementados à superfície), sendo estes normalmente utilizados em equipamentos a óleo ou detetores ultrassónicos (usados em seccionadores exteriores). Sensores de temperatura estão ligados ao cabo de modo a permanentemente monitorizar a subida de temperatura. Equipamento com SF₆ está invariavelmente equipado com alarmes e dispositivos de segurança para avisar em caso de perda de pressão, de modo a impedir a sua operação com níveis de pressão baixos. A crescente consciencialização das desvantagens associadas a um elevado número de defeitos, levou a uma rede de operação muito mais segura, recorrendo a interruptores e outros dispositivos de segurança. Muitas empresas de energia europeias têm uma equipa constantemente a monitorizar a rede durante a atividade da mesma [17] [30].

2.1.9 Avarias

Seccionadores, tal como todo o equipamento, pode sempre sofrer avarias. Estas não devem ser ignoradas ou apenas vistas como apenas algo a evitar que aconteça, mas devem ser cumpridas normas de segurança, de modo a que caso uma avaria aconteça, a rede possa continuar a funcionar em conformidade. As avarias podem ter origem humana, tal como manuseamento ou instalação



Figura 2.6: Sala de controlo de uma rede elétrica

errada do equipamento, ou origem ambiental, como interferências de animais com o equipamento, incêndios, inundações, chuva, vento, gelo e trovoadas entre outros [31] [32].

2.2 Laboratório de Alta Tensão

Neste capítulo será feita uma introdução ao laboratório onde foram realizados os ensaios, recorrendo a uma análise e descrição do espaço e equipamento presente, bem como a interação entre diferentes componentes presentes no mesmo.

O LAT teve a sua inauguração a 24 de maio de 2013. A sua construção apenas foi conseguida devido aos muitos esforços de vários docentes da FEUP, sendo neste momento o único laboratório de Alta Tensão com dimensão industrial afeto a um estabelecimento de ensino superior, permitindo fornecer aos alunos uma perspetiva experimental da matéria lecionada, que até então apenas se focava em conhecimentos teóricos. Esta componente prática, além de proporcionar um ponto de vista mais próximo da realidade, tem demonstrado uma grande capacidade de cativar alunos para a área da Alta Tensão.

Outra consideração a retirar dos poucos anos de funcionamento do laboratório passa pelo conhecimento e experiência adquiridos relativos a ensaios de rigidez dielétrica. Tendo sido grande parte do equipamento doado afeto a este tipo de ensaios, este foi um dos pontos em que o LAT mais se especializou. Realizam-se também um elevado número de ensaios para diversas empresas, nomeadamente a isoladores, seccionadores, celas de MT, entre outros. Os equipamentos encontram-se em perfeito estado de funcionamento, o que se deve a uma manutenção regular e aos cuidados operacionais aquando da sua utilização.

O laboratório permite realizar ensaios a vários equipamentos, tais como ensaios a transformadores, cabos, seccionadores, rigidez dielétrica de isoladores e inspeções em equipamentos TET,

de acordo com as normas internacionalmente estabelecidas para cada tipo de ensaio, assegurando sempre as que todas as condições de segurança são rigorosamente cumpridas. O LAT encontra-se no edifício J (Eletrónica Norte) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto no Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores.

O LAT em si é composto por várias salas: a sala de observação (no piso 1 – J102), a sala de comando e a sala de ensaios (ambas no piso 0 – J003 e J040 respetivamente). Na imagem que segue podemos observar rodeada por um círculo vermelho a sala de observação, rodeada por um círculo verde está a sala de comando e rodeada um círculo azul está a sala de ensaios.

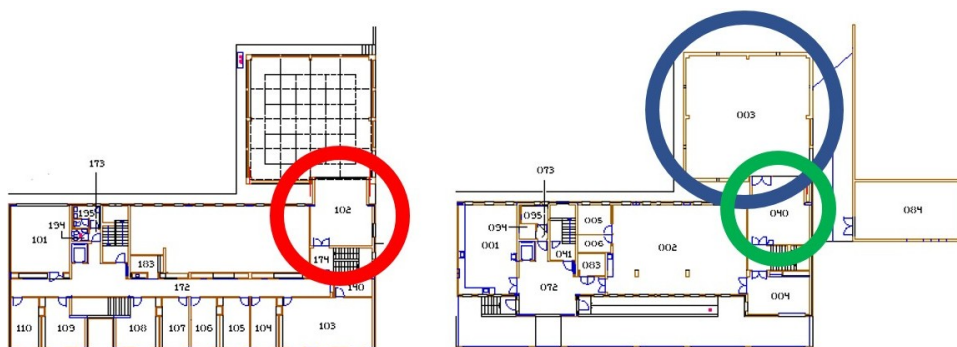


Figura 2.7: Imagem do piso 1 (à esquerda) e do piso 0 (à direita) do edifício J

2.2.1 Sala de Observação

A sala de observação permite a visualização de ensaios que ocorram na sala de ensaios sem a necessidade de estar na sala de comandos, permitindo uma vista de um ângulo superior.

2.2.2 Sala de Ensaio

A sala de ensaios pode ser dividida em várias partes de acordo com o seu equipamento. Começamos por analisar os equipamentos presentes individualmente. Em capítulos posteriores iremos analisar a sua interação e como podemos utilizá-los em conjunto de modo a atingir os objetivos a que nos propomos.

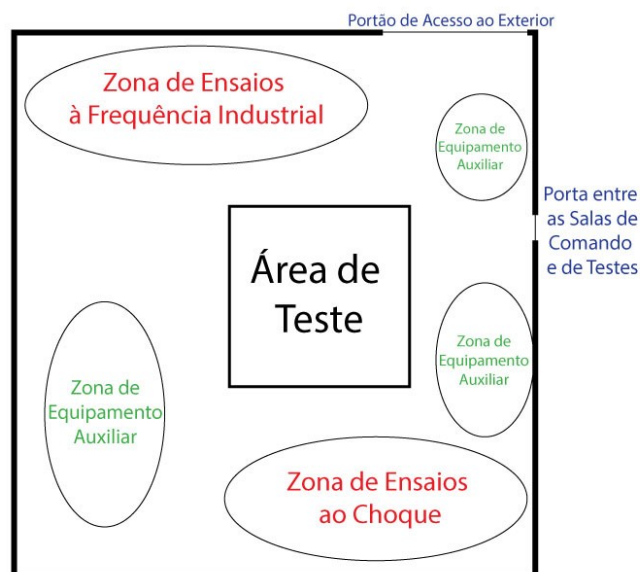


Figura 2.8: Esquema da sala de testes do LAT

Esta sala tem aproximadamente 147m^2 e com 11m de altura para disposição dos equipamentos. Iremos de seguida descrever um pouco os equipamentos que mais utilizamos nestes ensaios.



Figura 2.9: Panorâmica da sala de ensaios

- Gerador de Marx

Este gerador tem doze andares, tendo cada andar um condensador de $1.2\ \mu\text{F}$ capaz de armazenar até 100 kV, como são doze andares sendo capaz de atingir uma tensão de pico máxima de 1200 kV. Cada andar é constituído por duas esferas de descarga. A distância entre os explosores de esferas determina a tensão que é produzida por andar e quanto maior a distância entre eles, maior a tensão gerada. Podemos ainda curto-circuitar andares e instalar resistências em série e em paralelo. A implementação de resistências em série influencia a forma da frente da e resistências em paralelo influenciam a onda da cauda. Tendo em conta estas situações, podemos controlar a forma da onda recorrendo à aplicação correta de resistências.

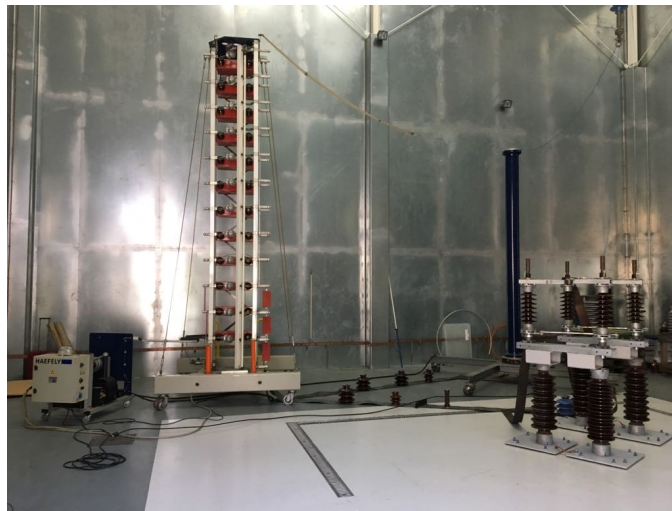


Figura 2.10: Gerador de Marx do tipo SGS 1200kV/36kJ

- Retificador do Carregamento

O retificador de carregamento é considerado parte constituinte da alimentação do gerador de Marx sendo alimentado através do quadro de comando do LAT. Tem por função carregar os condensadores dando assim origem aos altos valores de tensão obtidos. Esta unidade é também responsável pela escolha da polaridade da onda através da configuração manual dos díodos.



Figura 2.11: Retificador do carregamento tipo LGR 100-15

- Divisor de Tensão de Impulso

Este equipamento é constituído por condensadores em série que transformam a onda de impulso num sinal baixo o suficiente para ser lido pelo equipamento de medição. Este equipamento possui uma capacidade ao nível dos seus condensadores internos de 1200 pF, e uma resistência de amortecimento de 100Ω .



Figura 2.12: Divisor de tensão do tipo CR 1200kV

- Transformador

É constituído por dois módulos em cascata da marca Phenix. Cada módulo atinge até 300 kV, permitindo gerar até 600 kV. Esta configuração permite ainda, em caso de necessidade, utilizar apenas um dos módulos. O conjunto dos dois módulos permite alcançar uma potência máxima de 300 kVA, assim como uma intensidade de corrente de 0.5 A para a tensão máxima gerada pelo conjunto. A sua alimentação é feita apenas por uma fase à frequência industrial. Possui elevadas razões de transformação e intensidades baixas à saída de alta tensão com elevada resistência a curto-circuito.



Figura 2.13: Transformador de alta tensão 600 kV

- Divisor de Tensão

O divisor de tensão reduz os valores de tensão recorrendo a vários condensadores, diminuindo a amplitude do sinal o suficiente para poder ser lido por outros equipamentos. Modifica a tensão à qual o material em ensaio está sujeito, através de vários condensadores, tornando-o num sinal de menor amplitude, capaz de ser lido pela aparelhagem de medida. Possibilita, ainda, a ligação a um osciloscópio que permite observar e analisar a forma de onda aplicada ao objeto em questão. O divisor de tensão apresenta uma potência máxima de 23 kVA, quando sujeito à tensão máxima do transformador de 600 kV a uma frequência de 50 Hz, possuindo ainda uma capacidade interna dos seus condensadores de $500 \text{ pF} \pm 10\%$.



Figura 2.14: Divisor de tensão CW 600

- Espinterómetro de Esferas Vertical

O objetivo do espinterómetro é a calibração da aparelhagem de medida, sendo que uma das esferas se encontra suspensa e é alimentada pelo transformador, a outra está ligada à terra e é passível de ser deslocada dentro do LAT. Esta calibração é feita de 6 em 6 meses. As esferas têm 75 cm de diâmetro. Hoje em dia este tipo de equipamento caiu em desuso, contudo devido à possibilidade de erro dos divisores, torna-se mais apelativo recorrer ao espinterómetro. Uma das esferas está acoplada a um equipamento de locomoção com um motor que permite deslocações verticais precisas na ordem dos milímetros, esfera superior encontra-se suspensa (cf. Figura 2.15).



Figura 2.15: Espinterómetro de esferas vertical

- Reservatório de Água

Este reservatório tem a capacidade de 1000 L de água, cujo propósito é alimentar o sistema de

chuva. Este equipamento foi construído com o intuito de não alterar a condutividade, visto ser necessário manter este valor entre níveis admissíveis para os ensaios. O reservatório tem uma parte superior com uma abertura através da qual é possível inserir água no equipamento. Esta parte é amovível de modo a que, em caso de necessidade, seja possível efetuar operações de manutenção ao equipamento. O equipamento é de fácil transporte devido à aplicação de uma plataforma móvel na base do mesmo. Temos também uma torneira de drenagem no fundo do reservatório. A saída de água deste equipamento para os aspersores é regulada por uma bomba. Estes dois equipamentos são interligados recorrendo a três mangueiras independentes, cada uma alimentando o seu próprio braço do aspersor. Os valores da pressão desta bomba são anotados de modo a ser possível replicar ensaios.



Figura 2.16: Reservatório de água

- Aspersores

Este equipamento tem por objetivo a simulação de chuva. É alimentado pelo reservatório de água. Tem três pisos, sendo cada piso constituído por 3 braços e uma de fuga. Cada braço tem uma torneira sendo possível regular o ângulo de cada braço. A pressão de cada piso pode ser controlada abrindo a torneira de fuga, sendo ainda possível regular a abertura da torneira de cada braço [33] [34] [35]

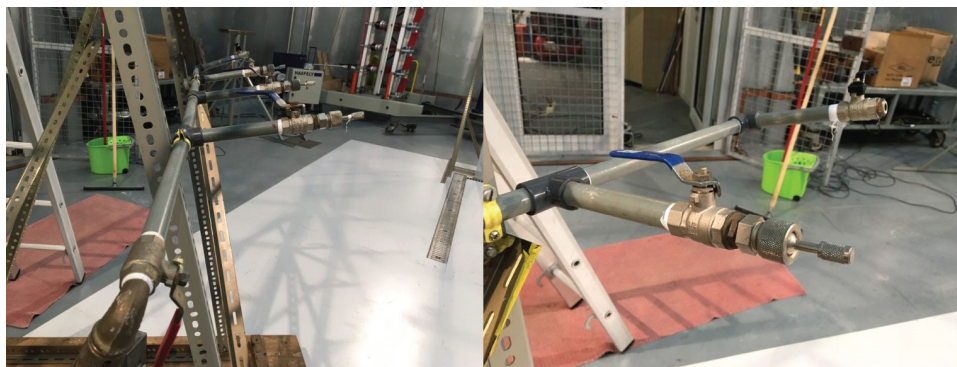


Figura 2.17: Aspersores

2.2.3 Sala de Comando

A sala de comando tem por função conduzir de maneira segura os testes. Todos os testes decorrem na sala de ensaios enquanto, o ensaio pode ser visto a partir da sala de observação num plano superior e na sala de comandos a nível térreo. A sala de comandos tem acesso a vários equipamentos de controlo e de análise de dados, permitindo obter informação e controlar o ensaio a decorrer.



Figura 2.18: Panorâmica da sala de comando

Iremos de seguida descrever os diferentes equipamentos que podemos encontrar na sala de comando.

- Módulo de Controlo

Este equipamento tem por função estabelecer a velocidade de carregamento dos condensadores, a tensão acumulada pelos mesmos, distâncias entre esferas de forma manual/automática, polaridade de onda de impulso e ainda o tipo de disparo (manual ou automático).

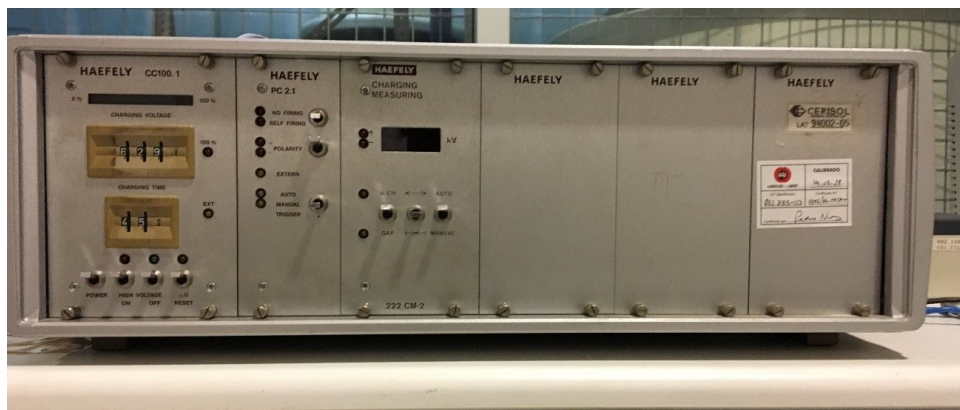


Figura 2.19: Módulo de controlo

- Sistema Digital de Análise de Impulso

O Sistema Digital de Análise de Impulso ou Digital Impulse Analyser System (DIAS) permite realizar a análise dos valores obtidos através do divisor de tensão, nomeadamente a forma de onda, o valor do tempo de frente e de cauda da onda, bem como o valor máximo de tensão.



Figura 2.20: Sistema DIAS (Digital Impulse Analyser System) 730

- Regulador de Tensão e Controlador de Tensão

A alimentação do transformador é feita pelo regulador, o qual funciona como um auto-transformador com tensão ajustável através de comandos elétricos por parte da unidade de controlo e medida. Possui dispositivos de corte e contactores que atracam quando é dada a ordem de ligar a alta tensão, sendo possível regular a tensão de saída através do controlador que se encontra na sala de comando, que possui dois botões de regulação: um de subida e outro de descida. A unidade de controlo e medida permite determinar a tensão a aplicar ao objeto de ensaio num processo ascendente e de velocidade determinada pelo operador. A amplitude da tensão de saída do transformador pode ser controlada bem como a velocidade da tensão aplicada ao objeto em ensaio



Figura 2.21: Regulador elevador (à esquerda) e unidade de controlo e medida (à direita)

[33] [34] [35] [36] [37].

2.2.4 Medidas de Segurança

Quando se trabalha em alta tensão as medidas de segurança são sempre imperativas podendo ser divididas em medidas de segurança ativas e passivas.

2.2.4.1 Medidas Passivas

Medidas passivas são medidas que já existem no sistema, não precisando de ser ativadas. Uma das medidas aplicadas foi a construção de uma gaiola de Faraday com o objetivo de escoar cargas elétricas para a terra em segurança. É constituída por chapas de zinco soldadas entre si. Na zona de passagem para a sala de comando a proteção é feita por malha metálica de 5×5 cm que permite a visualização dos ensaios a partir da sala de observação, que também reveste o portão exterior. Existe um barramento que circula o laboratório que se encontra fixado na parede [35] [37] [38] [39] [40] .

2.2.4.2 Medidas Ativas

Estas medidas permitem assegurar a proteção dos utilizadores do LAT contra eventuais erros que possam acontecer. Outro fator de segurança é o espaço, devido às reduzidas dimensões, o LAT não permite que ocorram vários testes em simultâneo. Relés e contactores atuam sobre condições lógicas estando ligados com os comandos, sensores e contactares da alimentação dos equipamentos. Um dos sensores está no portão que dá acesso à zona exterior estando outro junto ao acesso entre a sala de comando e de testes. A ativação destes sensores leva à abertura da alimentação aos equipamentos. Uma outra maneira de abrir a alimentação é recorrendo ao quadro de controlo de equipamentos do LAT presente dentro da sala de controlo. O quadro de controlo do LAT está dividido em diferentes níveis de segurança.

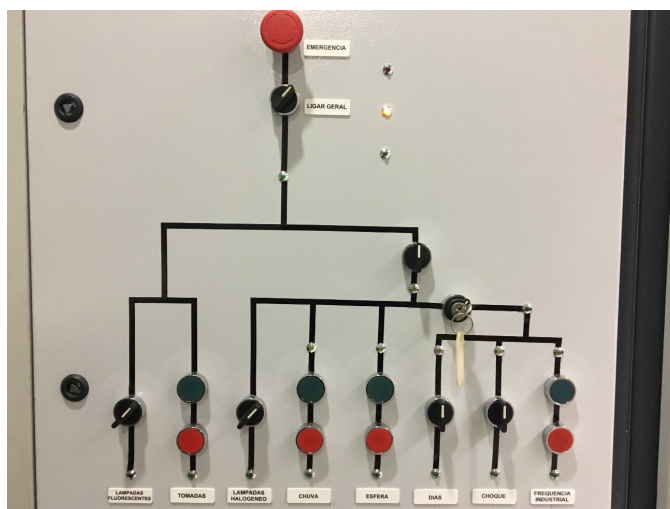


Figura 2.22: Quadro de controlo do LAT

O nível 1 permite o controlo das lâmpadas fluorescentes do teto e das tomadas do interior do LAT. A única maneira de desligar estes equipamentos é no quadro, visto não haver necessidade de recorrer a sistemas de segurança para as desligar, por estas não interferirem com a segurança dos ensaios. O nível 2 permite acionar as lâmpadas de halogéneo que se encontram nas paredes do laboratório, as tomadas de acionamento do sistema de chuva artificial e a esfera de calibração. Este nível caracteriza-se por equipamentos que podem funcionar com a porta da sala de comandos aberta, visto não terem influência direta no ensaio, contudo, condições atmosféricas exteriores inviabilizam o uso deste equipamento. Como tal, este nível é interrompido não só no quadro, como com a abertura do portão do LAT. O nível 3 permite-nos alimentar o gerador de choque ou o transformador de modo a podermos realizar ensaios. É importante não esquecer que estes ensaios requerem imensa segurança podendo ser letais. Assim, a alimentação dos equipamentos é interrompida com a abertura do portão do LAT, ou quando a porta da sala de comando é aberta, ou desligando no quadro. Para ligar o quadro é preciso acionar o equipamento recorrendo a uma chave (por razões de segurança). Caso a porta da sala de comando esteja aberta é possível ligar o DIAS. Os equipamentos dentro da sala de comando são alimentados pela mesma alimentação do edifício J [35] [37] [41] .

2.3 Conclusão

Em suma, o equipamento de seccionamento é essencial para os grandes desafios energéticos que se vivem, sendo essencial para o sector energético a capacidade de garantir a segurança e o bom funcionamento dos equipamentos, estando o Laboratório de Alta Tensão apto para efetuar ensaios que permitem assegurar estas capacidades. É importante conhecer os equipamentos que o constituem, devido não só à complexidade dos mesmos, mas também devido ao perigo que estes equipamentos provocam ao ser operados incorretamente.

Capítulo 3

Ensaio

3.1 Introdução

O objetivo dos ensaios prende-se com a necessidade de garantir a segurança e bom funcionamento dos equipamentos. Como tal, e de acordo com as normas, os equipamentos devem de ser devidamente ensaiados, não só pela entidade que efetivamente fabrica os equipamentos, bem como por laboratórios independentes de modo a obter resultados não tendenciosos.

Existem dois tipos de ensaios a que os seccionadores devem ser submetidos: ensaios de rotina e ensaios tipo.

Dentro destes tipos de ensaios, podemos fazer dois tipos: ensaios de resistência à tensão disruptiva (frequência industrial) e ensaios com descarga disruptiva. Ensaio de resistência à tensão disruptiva servem para verificar se o equipamento a ensaiar é capaz de resistir a uma tensão estipulada, a qual deve ser elevada segundo as condições estipuladas na norma e anteriormente referidas, bem como mantida no valor nominal durante 60 segundos. O objeto é aprovado caso não ocorram descargas disruptivas durante esse período de tempo. Após esse tempo, a tensão deve ser diminuída rapidamente, mas não subitamente para não originar transitórios que podem levar à descarga e danificação do objeto. Ensaio com descarga disruptiva têm como objetivo determinar o valor de tensão aproximado que origina a descarga disruptiva no objeto de ensaio. Deve aumentar-se a tensão de forma continua até que ocorra a descarga pelo objeto. Este procedimento deve ser repetido tantas vezes quantas o regulamento do objeto o indicar, e as medidas devem ser tratadas de forma estatística, tal como indicado na publicação [42] ou na norma regente do objeto de estudo.

3.2 Ensaio ao Choque

Nos ensaios ao choque, ou ensaio ao impulso atmosférico temos por objetivo a obtenção de uma onda normalizada 1,2/50 μ s, ou seja uma onda de choque atmosférico, com um tempo de frente de 1,2 μ s e tempo de cauda de 50 μ s.

Durante os ensaios o conjunto de condensadores da torre no gerador de Marx é carregado em paralelo recorrendo a uma fonte contínua, estando também interligado por resistências. A fonte vai carregar os terminais dos condensadores com polaridade positiva ou negativa, dependendo da posição dos díodos. O gerador de Marx possui a capacidade de produzir uma onda de frente rápida e normalizada de $(1,2/50 \mu s)$.

A onda de saída tem o intuito de replicar o comportamento de uma descarga atmosférica, por forma a avaliar o desempenho dos equipamentos em relação a esta ocorrência natural, ou a forma de uma onda de sobretensão com origem em manobras de seccionamento de um curto-circuito do sistema elétrico. A onda de impulso completa é decomposta em tempo de frente e tempo de cauda.

Tempo de frente é definido pelo intervalo de tempo entre 30% e 90% do valor de pico da onda obtida durante o ensaio. A linearização da curva entre esses pontos permite obter a origem virtual da onda e o tempo médio de subida da tensão. Para tempos de subida inferiores a $20 \mu s$ considera-se uma onda de choque atmosférico e para tempos de subida iguais ou superiores a $20 \mu s$ considera-se uma onda de sobretensão de manobra. O tempo de cauda é definido pelo tempo entre a origem virtual e o ponto na onda onde a tensão atinge 50% do valor máximo registado. Na imagem que se segue podemos ver vários pontos, nomeadamente o tempo de subida (T_1), tempo de cauda (T_2) e origem virtual (O_1).

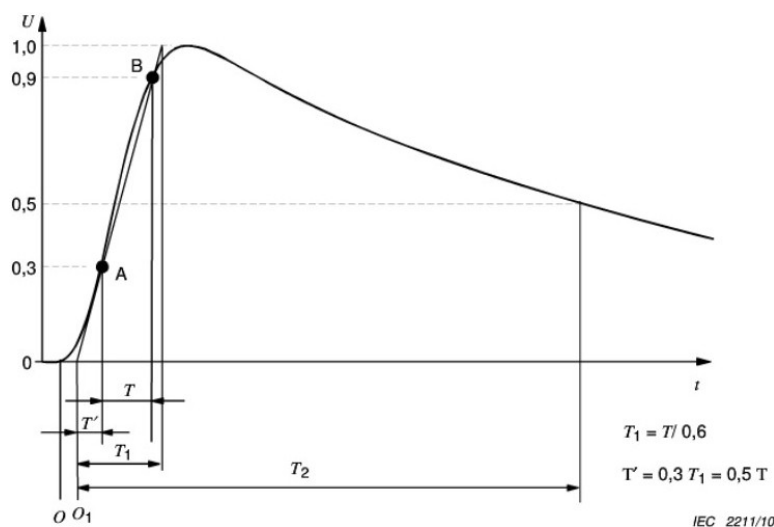


Figura 3.1: Onda de impulso completa

Caso não se verifique uma descarga disruptiva no equipamento ensaiado, o impulso obtido tem a forma completa, com valores de frente e cauda, caso ocorra disrupção, obtemos uma onda de impulso cortada, isto é, há um colapso rápido da tensão para valores praticamente nulos. O colapso da onda pode ocorrer durante a ascensão do valor de tensão, no valor máximo ou já na cauda da mesma. Nesta situação define-se tempo de corte (T_c) como o intervalo entre a origem virtual da onda e o momento de corte, que por sua vez é determinado pela intersecção do valor máximo de tensão obtido com a linearização dos pontos de 70% e 10% dessa tensão máxima.

Como explicado no capítulo anterior, entre estes dois equipamentos (condensador de polaridade negativa e positiva) encontramos um explosor de esferas cuja tensão de escorvamento é

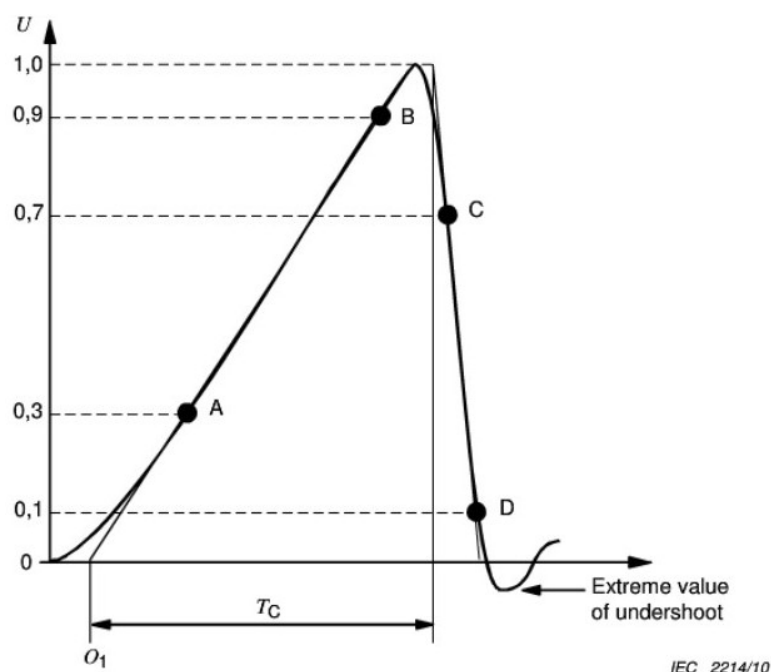


Figura 3.2: Onda de impulso atmosférico cortada na frente e determinação do tempo de corte

regulada para certo valor da tensão de carga. Quando a carga atinge a tensão de escorvamento, os condensadores, em série, descarregam pela resistência de cauda. Ao ajustar as resistências e as capacidades dos diferentes condensadores e andares do gerador, podemos obter uma onda de choque com os parâmetros desejados sendo, neste caso, o nosso objetivo obter parâmetros com os valores definidos pela norma para o ensaio em questão.

O divisor de tensão está ligado diretamente ao gerador da tensão e antes do equipamento. É constituído por vários condensadores em série que transformam a onda de choque num sinal passível de ser medido pelo sistema DIAS. Em ensaio, tem como função medir a tensão da descarga.

A tensão de ensaio em si é controlada pela unidade de controlo bem como o tempo de carregamento. Essa informação é transmitida pelo sistema digital de análise de impulso ao retificador. Este dá início ao carregamento dos condensadores em paralelo que, quando carregados, um trigger será acionado (manual ou automaticamente) que provoca uma disrupção controlada entre as esferas explosoras através da transição dos condensadores de paralelo para série. O *trigger* consiste em injetar mais de 2 kV que irá dar início à descarga. Assim, o descarregamento dos condensadores é feito em série, sendo assim a tensão máxima de saída a soma de toda a tensão armazenada em cada andar. Dependendo do valor que queremos para a tensão podemos alterar o número de andares em funcionamento através de um pequeno curto circuito aos andares superiores.

A não ser que especificado, as tolerâncias para ensaios devem ser as seguintes:

- Valor da tensão pico de ensaio: $\pm 3\%$
- Tempo de frente da onda: $\pm 30\%$
- Tempo de cauda: $\pm 20\%$

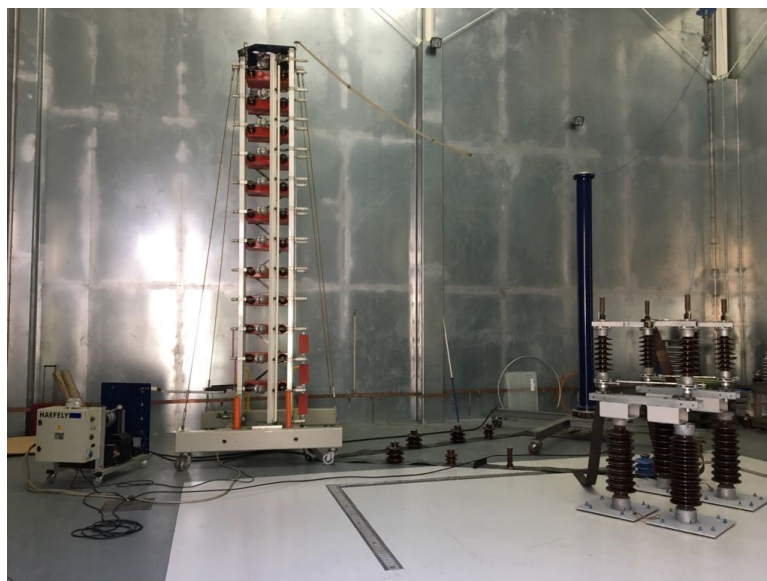


Figura 3.3: Ligação entre o gerador de Marx, divisor de corrente e seccionadores a serem testados

Em virtude deste ensaio ser um impulso com frequências elevadas, irá provocar efeitos indutivos. Como tal recorreremos à utilização de chapas de cobre no sistemas de terras como forma de minimizar esse efeito [43] [44] [42].

3.2.1 Método Up and Down

O método consiste em m grupos com um valor de n tensão igual por cada piso do gerador. A tensão a aumentar ou diminuir por cada grupo sucessivo é alterada por um pequeno valor de ΔU , de acordo com os resultados anteriores do grupo a ensaiar. Dois procedimentos de ensaio são utilizados, um apropriado para contornamentos (crescente) e outro apropriado para suportabilidade (decrecente). Quando $n = 1$, os dois procedimentos convergem num procedimento up and down de 50 % de contornamento.

Este ensaio tem como objetivo determinar a tensão máxima de suportabilidade, ou seja, o intervalo mínimo de valores que separa o contornamento do não contornamento. Assim, após obtermos um contornamento, descemos a tensão para o valor anterior, caso não ocorra, aumentamos a tensão um degrau de cada vez até obter um contornamento.

Este ensaio é concluído quando temos pelo menos vinte iterações do ensaio. Para calcular o valor médio do limite de tensão fazemos uma média das tensões utilizadas nos vinte ensaios, contudo se o valor de tensão apenas ocorreu uma vez, não é utilizado na média [43] [42].

3.3 Ensaio à Frequência Industrial

Recorremos a este sistema quando necessitamos de estudar a rigidez dielétrica de um certo material podendo este ensaio ser aplicado com diferentes condições climáticas.

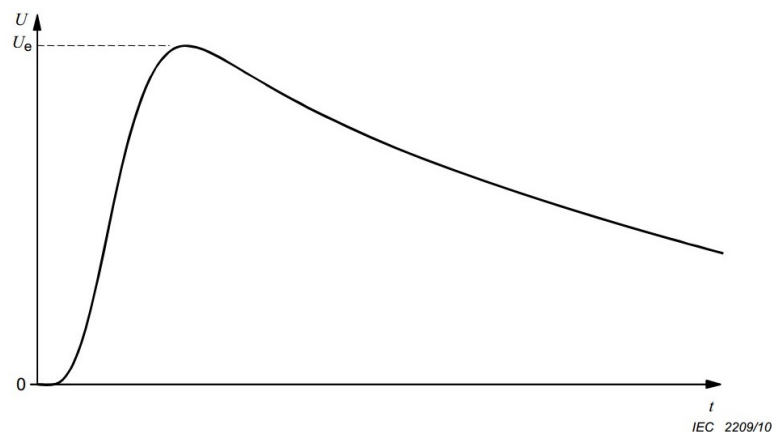


Figura 3.4: Exemplo de uma onda típica de uma descarga completa

A forma de onda deve aproximar-se de uma sinusóide com diferenças de pico da magnitude positiva e negativa com valores inferiores a 2%. Os resultados dos testes de alta tensão não são afetados por pequenos desvios sinusoidais se a razão entre o valor de pico e r.m.s for igual a $\sqrt{2} \pm 5\%$.

As durações do teste devem rondar, mas não exceder os 60 segundos e os valores medidos devem ser mantidos em $\pm 1\%$ do valor especificado durante o ensaio. Para ensaios com mais de 60 segundos os valores medidos devem ser mantidos em $\pm 3\%$.

A voltagem de teste deve ser estável o suficiente para ser pouco afetada pela variação de fugas de corrente.

O procedimento requer uma onda sinusoidal cuja amplitude é regulável, cujos resultados são utilizados para determinar um dimensionamento apropriado dos sistemas de energia onde podemos inserir este equipamento, garantindo o funcionamento seguro dos mesmos para os níveis de tensão em jogo. A aplicação da tensão deve começar com magnitude baixa, por forma a prevenir a ocorrência de correntes transitórias de valor elevado devido à comutação de circuitos. A ascensão desde o valor inicial deve ser lenta para permitir a leitura dos instrumentos de medição, mas não de tal forma lenta que provoque o aumento prolongado da solicitação elétrica estipulada no objeto de ensaio.

O transformador irá fornecer a tensão ao divisor de tensão que reduz a amplitude da tensão, proporcionando uma maior segurança aos operadores e permitindo a leitura dos valores de tensão sendo possível recorrer ao osciloscópio de modo a analisar a forma de onda em questão. O transformador é alimentado pelo regulador elevador, que permite ajustar a tensão e ligado ao divisor, que reduz a amplitude da tensão para ser medida. A unidade de controlo e medida permite controlar tensão a aplicar ao objeto de ensaio e determinar a velocidade de subida/descida da tensão aplicada ao objeto em ensaio.



Figura 3.5: Ligação entre o transformador, divisor de tensão e seccionadores a serem testados

Tal como acima mencionado os ensaios podem ser aplicados sobre diferentes condições climáticas, como ensaios a chuva e a seco, sendo necessário recorrer ao sistema de chuva e todos os seus componentes para conseguir este objetivo. Os procedimentos aplicáveis a objetos a ser ensaiados devem ser especificados, tendo em conta fatores como a precisão necessária do resultado dos ensaios em questão, a dispersão natural dos valores dos resultados obtidos, a dependência dos valores da polaridade e a possibilidade de deterioração progressiva de aplicações retidas da tensão. Durante o ensaio, o equipamento deve estar completo em todas as suas componentes essenciais, deve ter a sua colocação e receber o tratamento igual ao que receberia no seu funcionamento normal, estando climatizado à temperatura ambiente da área de teste e a temperatura de equilíbrio entre o equipamento e o ambiente deve ser devidamente registada [45] [44] [42].

3.3.1 Ensaio a Seco

Os fatores que caracterizam as descargas disruptivas num equipamento com isolamento externo podem ser afetadas pela disposição geral do equipamento, devendo este ser devidamente colocado e instalado. Um fator importante a ter em conta é ter a certeza que a distância do ponto mais próximo da estrutura a outro equipamento não deve ser inferior a 1.5 vezes o comprimento da descarga mais curta possível. Em ensaios à chuva, o caminho no equipamento de teste torna os efeitos de proximidade insignificantes. No gráfico seguinte podemos ver uma relação entre a Distância mínima (D) recomendada a objetos externos ou ligados à terra com tensão máxima positiva de comutação de U [42].

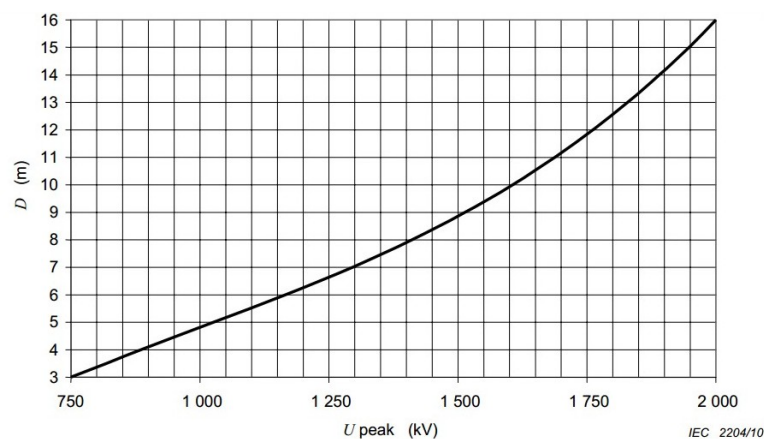


Figura 3.6: Relação entre D e U

3.3.2 Ensaios Sob Chuva

Os ensaios sob chuva têm por objetivo simular o efeito da chuva natural no isolamento exterior e verificar se o equipamento se comporta de acordo com o admitido pelas normas. É recomendado para ensaios com todos os tipos de tensões e todos os tipos de equipamentos. O equipamento a ensaiar deve ser pulverizado com água de resistividade e temperatura previstas caindo como gotículas. A intensidade do pulverizador deve ser sensivelmente igual nas suas componentes horizontais e verticais sendo ensaiada recorrendo a um recipiente coletor dividido com aberturas entre 100 cm^2 a 750 cm^2 , uma horizontal e uma vertical, estando a vertical virada para o pulverizador. Durante a pulverização devemos evitar criar névoa de modo a manter a fiabilidade do ensaio.



Figura 3.7: Coletor de calibração do ensaio à chuva

A replicabilidade dos ensaios à chuva é, de um modo geral, menor que para outros ensaios de alta tensão. Para minimizar a dispersão, as seguintes precauções devem ser tomadas:

- O recipiente deve ser colocado perto do equipamento a ser testado evitando queda direta de gotas ou salpicos;
- Durante a medição o recipiente deve ser movido lentamente sobre a área de superfície suficiente de modo a medir o efeito de não uniformidade da pulverização de água;

- A zona de medição em si deve ter o tamanho igual à do objeto em ensaio para uma altura máxima de 1 metro;
- Para objetos entre 1 e 3 metros, devem ser divididos em três áreas iguais e cada área deve ser medida individualmente, devendo todas respeitar os valores necessários para o coletor;
- Se forem maiores que 3 metros, devem ser divididas no valor máximo possível de zona de modo a que cada área não exceda 1 metro.

O aspersor deve ser ajustado de acordo com os procedimentos tendo em conta as tolerâncias de precipitação especificada de acordo com a tabela.

Condições de precipitação	Unidade	Limites
Valor médio de precipitação das medidas da componente vertical/componente horizontal	mm/min	1.0 até 2.0
Limite para cada medida individual para cada componente	mm/min	± 0.5 da média
Temperatura da Água	°C	Temperatura Ambiente ± 15
Condutividade da Água	$\mu\text{S/cm}$	100 ± 15

Tabela 3.1: Condições de precipitação para os procedimentos standard

A temperatura e resistividade da água devem ser medidas numa amostra antes da água atingir o objeto de ensaio. Podem também ser medidas dentro do reservatório desde que não aconteça nenhuma mudança relevante durante o período entre a água estar no reservatório e atingir o objeto em teste. O equipamento a ser ensaiado deve ser pré humedecido com a água que será utilizada no ensaio nas condições acima especificadas durante os primeiros 15 minutos (estes 15 minutos não incluem o tempo de ajuste da precipitação) e estas condições devem permanecer dentro das tolerâncias especificadas durante o ensaio que devem acontecer sem interrupções. É possível utilizar água da rede para humedecer o equipamento durante 15 minutos seguidos e sem interrupção de um segundo pré-humedecimento de 2 minutos antes do ensaio usando a água correta. O procedimento de teste deve ser o mesmo que o especificado para os testes a seco. A duração do ensaio para uma corrente alternada deve ser 60 segundos, salvo disposição em contrário. O fator de correção da densidade é aplicado conforme a norma [42], mas nenhum fator de correção de humidade deve ser aplicado para os ensaios em chuva (k_2).

3.4 Correções Atmosféricas em Ensaaios

A referência standard para as condições atmosféricas (bem como as unidades standard das mesmas) de acordo com o que é atualmente estabelecido nas normas é a seguinte:

- Temperatura (t_0) = 20 °C;

- Pressão Absoluta (p_0) = 1 013 hPa (1 013mbar);
- Humidade Absoluta (h_0) = 11g/m³.

As descargas disruptivas de isolamentos externos dependem das condições atmosféricas. Normalmente os caminhos para descarga são facilitados com o aumento da densidade ou humidade do ar. Contudo, quando a humidade relativa é superior a 80% a descarga torna-se irregular, especialmente quando a descarga ocorre sobre uma superfície isolada. A descarga é proporcional à correção atmosférica de fator K_t .

O seu valor resulta do produto de dois fatores de correção que serão apresentados na seguinte equação.

$$K_t = k_1 k_2$$

Como podemos ver pela equação acima, o valor do fator de correção atmosférica (representado por K_t) pode ser obtido recorrendo à multiplicação do fator de correção da densidade do ar (representado por k_1) pelo fator de correção da humidade do ar (representado por k_2) [42].

3.4.1 Aplicação dos Fatores de Correção

Ao aplicar os devidos fatores de correção, a tensão da descarga disruptiva é medida. Os fatores de correção e as medições devem ter sempre em conta as condições de teste. Medições que são sempre necessárias fazer são:

- Temperatura (t)
- Pressão (p)
- Humidade (h)

Estas medições podem ser feitas em unidades diferentes das unidades de referência, desde que seja possível converter as mesmas para as unidades e valores de referência t_0 , p_0 e h_0 . Tensão das descargas disruptivas que são medidas em testes são corrigidas para U_0 recorrendo à seguinte equação.

$$U_0 = \frac{U}{K_t}$$

Assim, podemos obter a tensão de referência (U_0) através da divisão da tensão medida (U) pelo fator de correção atmosférica (K_t).

O teste deve sempre conter as condições atmosféricas atuais durante o teste e os devidos fatores de correção aplicados. O valor da variável k_1 depende da densidade relativa do ar (δ) e pode ser expressa como:

$$k_1 = \delta^m$$

Esta operação permite obter o fator de correção da densidade do ar (k_1) através da exponenciação da densidade relativa do ar (δ) por m (cujo valor pode ser encontrado na tabela representada na Figura 3.9).

Quando a temperatura t e t_0 são expressas em graus Celcius e as pressões atmosféricas p e p_0 são expressas na mesma unidade, a densidade relativa do ar é possível obter recorrendo à pressão medida e padrão bem como à temperatura medida e padrão.

$$\delta = \frac{p}{p_0} \times \frac{273 + t_0}{273 + t}$$

A correção k_1 é considerada se os seus valores estão entre 0.8 e 1.05.

$$0.8 < k_1 < 1.05$$

O valor de correção da humidade pode ser expresso por:

$$k_2 = k^\delta$$

Sendo w um expoente dado na Figura 3.9 e k um parâmetro que depende do tipo de teste em si, podendo ser obtido em função do rácio da humidade absoluta h para a densidade do ar (δ) recorrendo às seguintes equações.

Em caso de DC:

$$k = 1 + 0.014 \times \frac{h}{\delta - 11} - 0.00022 \times \left(\frac{h}{\delta - 11} \right)^2, \text{ para } 1 \text{ gm}^3 < \frac{h}{\delta} < 15 \text{ gm}^3$$

Em caso de AC:

$$k = 1 + 0.012 \times \frac{h}{\delta - 11}, \text{ para } 1 \text{ gm}^3 < \frac{h}{\delta} < 15 \text{ gm}^3$$

Em caso de se tratar de apenas um impulso:

$$k = 1 + 0.010 \times \frac{h}{\delta - 11}, \text{ para } 1 \text{ gm}^3 < \frac{h}{\delta} < 20 \text{ gm}^3$$

Abaixo podemos ver uma tabela presente na norma [42] que nos permite descobrir k em função da relação $\frac{h}{\delta}$ de acordo com se tratar de AC, DC ou Impulso.

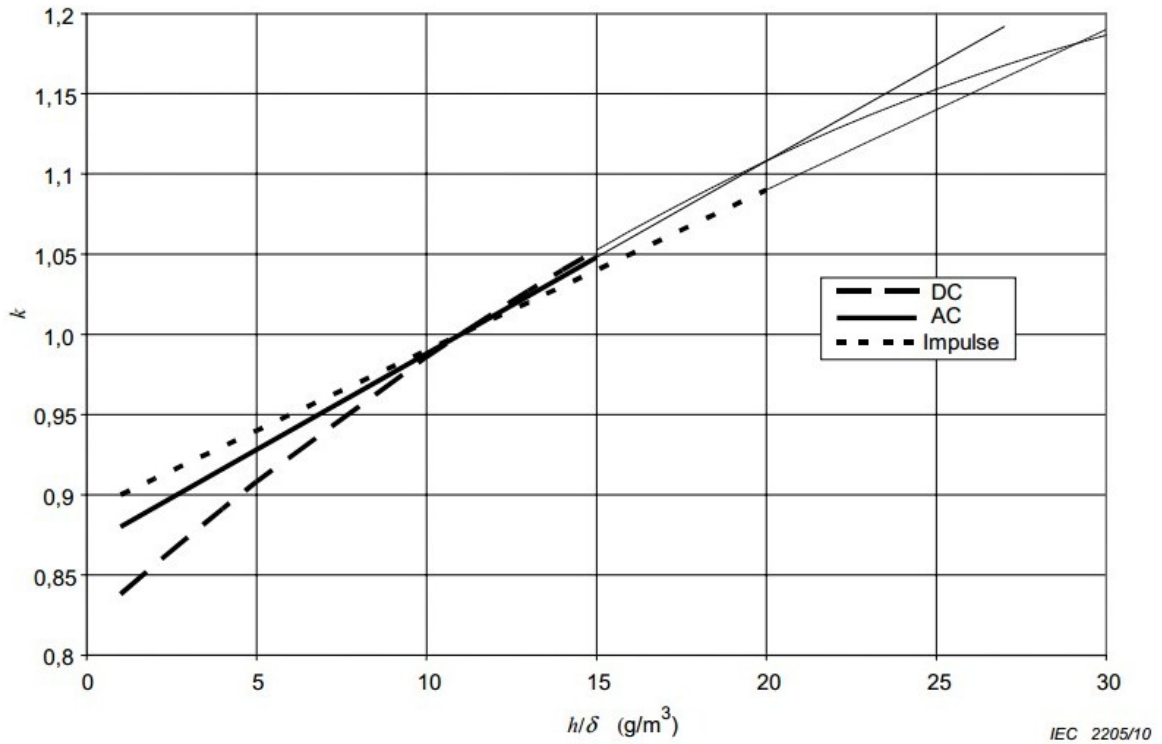


Figura 3.8: Gráfico que ilustra os valores de k

Para tensões médias abaixo de 72.5 kV não é possível especificar os valores da correção de humidade. Para determinar os expoentes m e w temos de considerar o parâmetro:

$$U = \frac{U_{50}}{500 \times L' \times k \times \delta}$$

Na equação acima podemos ver o uso da variável U_{50} que indica o valor de 50% da tensão de descarga disruptiva (quer seja a medida ou a estimada) nas condições atmosféricas atuais, cujo valor deve ser apresentado em kV pico. L' é o caminho mais curto de descarga em metros, enquanto δ é, novamente, a densidade relativa do ar e k é a dimensão do menor parâmetro definido nas equações anteriormente mencionadas. No caso de não ser possível obter U_{50} podemos assumir o seu valor como sendo 1.1 vezes a tensão de teste U_0 . As expoentes m e w são obtidas através da tabela presente na seguinte imagem para os diferentes intervalos de g [42].

g	m	w
$<0,2$	0	0
0,2 to 1,0	$g(g-0,2)/0,8$	$g(g-0,2)/0,8$
1,0 to 1,2	1,0	1,0
1,2 to 2,0	1,0	$(2,2-g)(2,0-g)/0,8$
$>2,0$	1,0	0

Figura 3.9: Gráfico que ilustra os valores de m e w em função de g

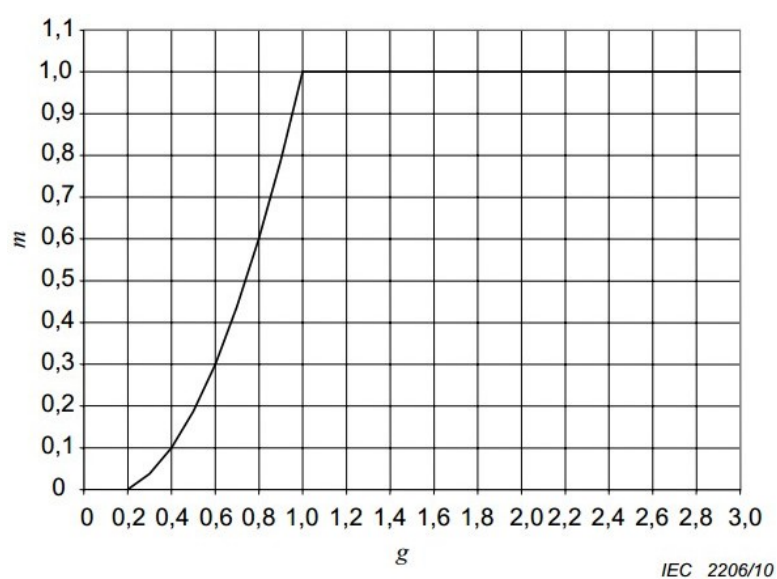


Figura 3.10: Gráfico que ilustra o valor de m em função de g

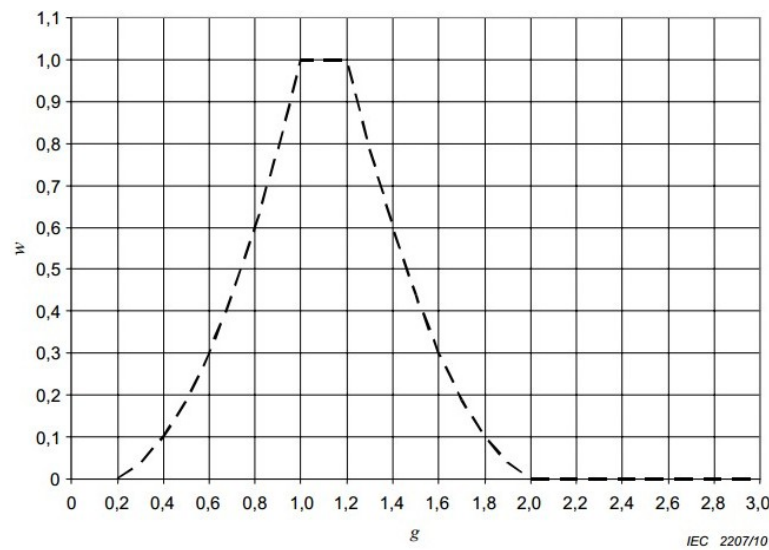


Figura 3.11: Gráfico que ilustra o valor w em função de g

3.4.2 Parâmetros de Humidade Atmosférica

A humidade deve ser medida diretamente através da humidade absoluta, com uma incerteza não superior a $1 \frac{g}{m^3}$. A medida da humidade relativa e temperatura ambiente podem ser usadas para a determinação da humidade absoluta utilizando a seguinte fórmula, desde que a precisão da humidade absoluta seja mesma que a anteriormente mencionada.

$$h = \frac{6.11 \times R \times e^{\frac{17.6 \times t}{243+t}}}{0.4615 \times (273 + t)}$$

Aqui, h é a humidade absoluta em $\frac{g}{m^3}$, R é a humidade relativa em percentagem e t é a temperatura ambiente em $^{\circ}C$.

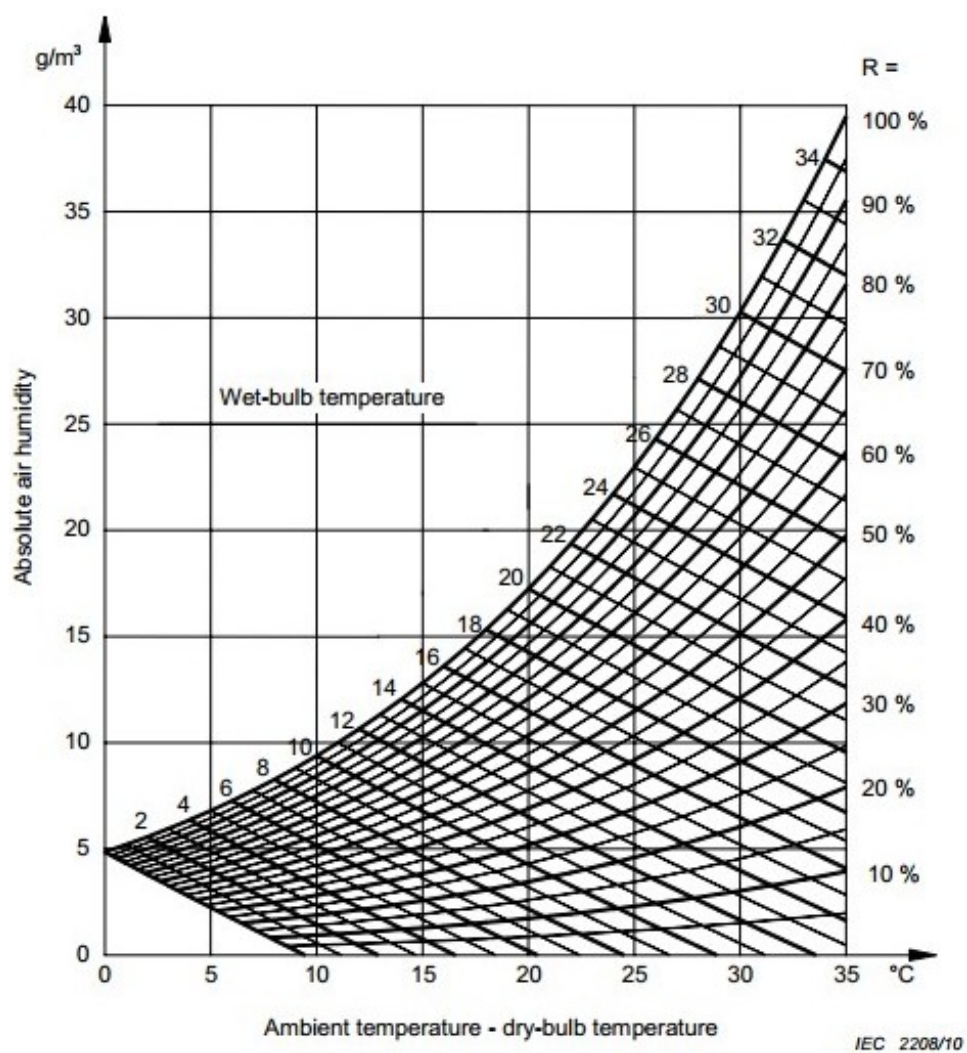


Figura 3.12: Relação entre a temperatura ambiente e a humidade absoluta do ar

A temperatura deve ser medida com uma incerteza não superior a 1°C . A pressão absoluta de ambiente deve ter uma incerteza inferior a 2 hPa [42].

Capítulo 4

Implementação de Ensaios

Neste capítulo serão explanadas as preparações necessárias a fazer no LAT tendo atenção a água decorrente do sistema de simulação de chuvas, para ter a certeza que os ensaios planeados ocorrem de uma maneira correta e segura, sendo dado um foco especial no ensaio à chuva.

4.1 Preparação da Zona de Ensaios

De modo aos ensaios decorrerem com a segurança e qualidade desejada, torna-se necessário preparar devidamente a zona de testes. Com esta preparação pretende-se obter:

- Aumentar a replicabilidade de ensaios;
- Diminuir o tempo entre diferentes ensaios;
- Assegurar a segurança do equipamento presente no LAT;
- Assegurar que todo o equipamento está ligado à terra, aumentando a segurança caso haja um contornamento;
- Certificar que o equipamento encontra-se de tal modo que pode ser facilmente acessado para poder ser descarregado;

4.1.1 Preparação da Área de Ensaios à Chuva

Os ensaios em questão envolvem a simulação de chuva nos equipamentos. Isto requer a utilização de água com propriedades específicas de condutividade. Devido ao espaço limitado para armazenar o material do laboratório, recorre-se ao uso de cortinas de plástico para evitar que a chuva afete regiões fora da zona de teste, impedindo que outros equipamentos sejam molhados ou a criação de poças de água noutros sítios, sendo estas possivelmente problemáticas em situações de descarga, para além do facto de deteriorar o chão do laboratório.



Figura 4.1: Montagem dos apoios

Iniciamos por montar apoios que serão interligados por varões, onde são penduradas as cortinas. Na imagem seguinte podemos à esquerda ver a montagem dos apoios, enquanto que à direita vemos as cortinas perduradas nos varões.

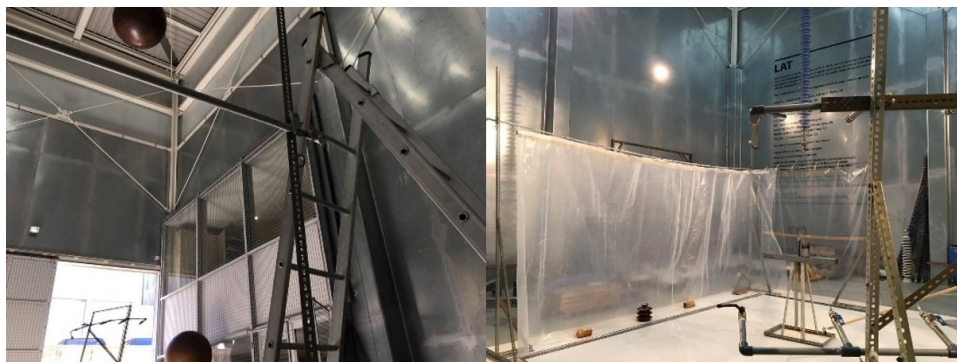


Figura 4.2: Montagem dos apoios às cortinas

Após ter esta secção devidamente preparada, procedemos ao desempacotamento e montagem de dois dos seccionadores numa plataforma de testes. A condutividade elétrica é representada como a facilidade da passagem de eletricidade na água e é normalmente mensurada em milisiemens por cm^2 . A concentração de compostos orgânicos e inorgânicos interfere nos valores da condutividade, bem como a temperatura. A necessidade de correção da temperatura é um dos pontos mais críticos da medição da condutividade. Compostos de hidrogénio conduzem melhor a eletricidade, contudo bicarbonetos pioram a condutividade.

De modo a termos água com a condutividade apropriada foi pedido ao Departamento de Química da FEUP que fizesse uma análise à condutividade da água do poço do LAT, que demonstra

que esta água tem uma condutividade de $232.5 \mu\text{S}/\text{cm}^2$. Estes valores são superiores às tolerâncias especificadas, como tal, o Departamento de Química ofereceu vários litros de água destilada cuja condutividade entre os 5 a $6 \mu\text{S}/\text{cm}^2$, recomendando uma mistura entre a água fornecida com a do poço no rácio de 200 mL de água do poço por 300mL de água fornecida. No final, conseguimos obter cerca de 600L de água com $89.7 \mu\text{S}/\text{cm}^2$ de condutividade.

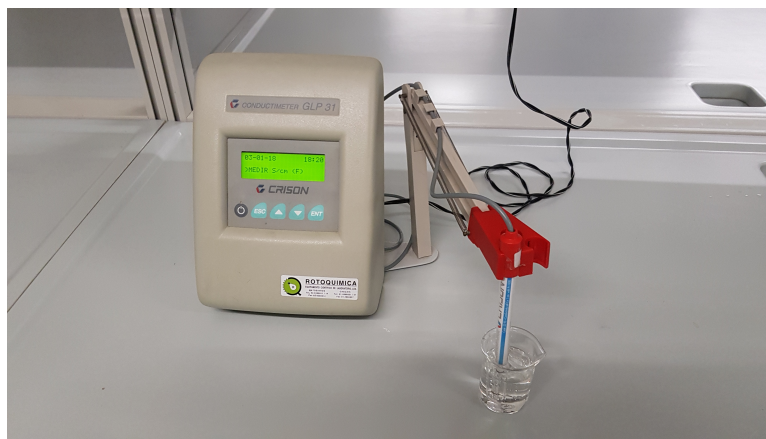


Figura 4.3: Medição da condutividade de uma amostra de água

4.1.2 Montagem do Seccionador

Para começarmos a preparar os ensaios aos seccionadores devemos ter em conta o equipamento que nos foi entregue pela EFACEC. O seccionador entregue é um seccionador horizontal duplo (SHD) que veio devidamente protegido em caixas de madeira, aptas para o transporte destes equipamentos.



Figura 4.4: Seccionador dentro da caixa de madeira

O equipamento foi retirado das caixas de madeira, montada a infraestrutura onde são assentes os pólos, começando por assentar as bases que pode ser visto na seguinte imagem.

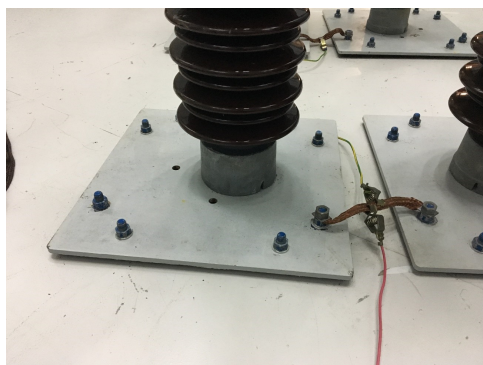


Figura 4.5: Bases onde assenta a estrutura do equipamento ligadas à terra

De seguida foram instalados os isoladores de modo a haver uma separação entre a parte onde são assentes os seccionadores e as bases, evitando os efeitos nefastos para o teste que as bases ligadas à terra poderia ter ao influenciar o comportamento do arco. Os equipamentos são aparafusados entre si de modo a tornar a estrutura mais sólida e coesa, evitando possíveis quedas que danificariam o equipamento. Para finalizar, instalou-se em cima destas estruturas o seccionador a ser ensaiado.

As medidas dos seccionadores são extremamente importantes na medições pretendidas, nomeadamente nas correções atmosféricas, sendo a distância entre o ponto a ser alimentado e o ponto condutor mais próximo considerado nos cálculos. Foram medidos os seccionadores em várias localizações e em todos os casos o ponto condutor mais próximo encontra-se a 32 cm. Esta distância é a do isolador onde o pólo assenta, separando a base condutora do pólo a ser alimentado.

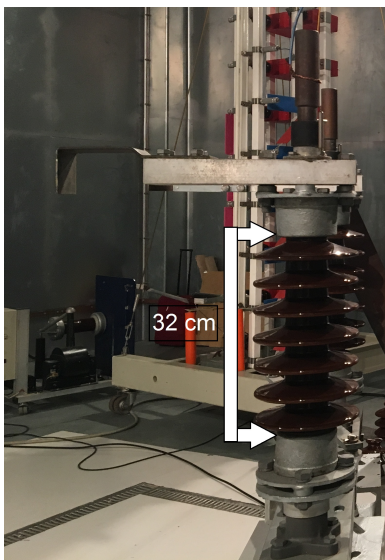


Figura 4.6: Distância entre o ponto a ser alimentado e o ponto condutor mais próximo

Foram também designadas nomenclaturas para cada um dos pólos de modo a ser mais fácil a sua identificação que pode ser visto nas imagens seguintes.

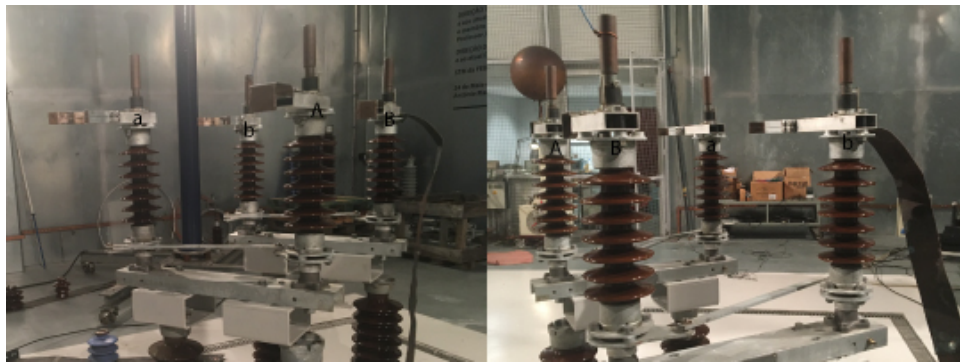


Figura 4.7: Nomenclatura dos pólos

Seguidamente verifica-se a regulação de funcionamento do depósito de água. O local de drenagem do equipamento encontra-se centímetros acima do fundo do equipamento. É de notar que este equipamento não era utilizado há cerca de 5 anos, sendo assim necessário verificar as condições do equipamento. Notou-se a existência de água dentro deste (não tendo sido totalmente drenado aquando da sua última utilização – provavelmente por causa da altura da torneira de drenagem).



Figura 4.8: Torneira de drenagem do reservatório

Devido à posição errada da torneira, foi necessário tomar o equipamento para poder remover a água existente, verificar o estado do interior do depósito, podendo assim corroborar se este estava em condições boas para a sua utilização (ex. que não mudaria a condutividade da água que seria guardada nele) e limpar. Após esta operação de manutenção ao equipamento, começa o processo de calibrar o funcionamento da bomba e dos aspersores.

4.1.2.1 Aspersores

O equipamento deve ser calibrado de modo a estar de acordo com a norma [42], tal como explicado no capítulo anterior, os aspersores devem emitir entre 1 a 2 mL de água por componente vertical e horizontal durante um minuto. Primariamente são feitas operações de rotina tal como a limpeza do interior dos aspersores, removendo eventuais obstruções à passagem de água nas

condições desejadas. Após verificar se o equipamento cumpre a sua função devidamente, torna-se necessário proceder à sua calibração. O método utilizado é um método tentativa erro, ajustando o equipamento conforme os resultados obtidos com o teste de precipitação até atingir os valores pretendidos de componente vertical e horizontal. Este processo de calibração leva vários dias devido ao facto do equipamento ser construído de uma maneira um pouco rígida, sendo difícil obter replicabilidade nos valores de ensaio. Esta baixa replicabilidade é normal neste tipo de equipamentos de simulação de chuva. Após ter o equipamento devidamente calibrado, o LAT recorre ao Departamento de Química de modo a obter água com as características de condutividade pretendidas.

4.2 Conclusão

Durante os ensaios, o equipamento de simulação de chuva apresentou pouca capacidade de replicabilidade e de difícil controlo. Embora estes ensaios sejam caracterizados por esta pouca capacidade, sugere-se a criação ou transformação do equipamento atual com os diversos objetivos, como sejam a fixação da posição do equipamento, a regulação do ângulo de cada aspersor individualmente e por braço e a regulação da pressão por braço. Devido à utilização de rodas como locomoção, este equipamento acaba por ser difícil colocar na mesma posição duas vezes. Assim, uma das maneiras de conseguir replicar com frequência seria alterar o mecanismo de movimentação para um mecanismo de suspensão tal como diferentes equipamentos já usam no LAT. Seguidamente criar-se-ia um ângulo entre uma linha criada no chão que permite replicar a posição. A corda seria controlada no rolamento, estando a corda perto dos manípulos marcada com números. A base do equipamento seria extensível, permitindo ajustar o ângulo do equipamento mais convenientemente. O ângulo do equipamento em si seria regulado por uma outra roldana que teria o mesmo sistema de medição da anterior. Um possível sistema de regulação de ângulo seria recorrer a rodas dentadas, onde cada buraco da roda teria um número em particular. Estas rodas iriam funcionar para o braço todo e individualmente para cada aspersor permitindo regular o ângulo do próprio equipamento. Existe uma torneira de fugas em cada braço que nos permite regular a pressão de cada braço. É notória a falta de um equipamento que meça a pressão da água no braço. A sua utilização seria mais fácil recorrendo a um equipamento que meça a pressão da água no braço, podendo assim regular melhor a pressão em cada braço. Estas medidas contribuiriam para tornar o ensaio mais repetível, permitindo a aplicação sequencial dos valores apresentados no relatório de replicabilidade, abaixo descrito.

Relatório de Replicabilidade			
Posição			
Altura aproximada	metros	Nº da roda dentada 1	
Ângulo em relação à risca	graus	Nº da roda dentada 2	
Ângulo em relação ao plano	graus		
Obs. _____			

Ângulo			
Ângulo do braço 1	graus	Aspersor 1	graus
Aspersor 2	graus	Aspersor 3	graus
Obs. _____			

Ângulo do braço 2	graus	Aspersor 1	graus
Aspersor 2	graus	Aspersor 3	graus
Obs. _____			

Ângulo do braço 3	graus	Aspersor 1	graus
Aspersor 2	graus	Aspersor 3	graus
Obs. _____			

Pressão			
Pressão na bomba principal		Pressão da bomba no braço 1	
Pressão da bomba no braço 2		Pressão da bomba no braço 3	
Obs. _____			

Figura 4.9: Exemplo de uma proposta de relatório de replicabilidade

Capítulo 5

Calibração com Espinterómetro de Esferas do Equipamento de Ensaio

5.1 Calibração

Durante os ensaios, a qualidade da leitura dos equipamentos de medição é da maior importância, sendo a informação que eles nos transmitem a base para a análise do equipamento e do seu comportamento nos diferentes ensaios. Assim, recorreremos ao espinterómetro de esferas para podermos calibrar o equipamento de leitura.

Para podermos iniciar este ensaio é necessário ter as duas esferas perfeitamente alinhadas. Isto é conseguido recorrendo a um nível que permite verificar se as duas se encontram a cobrir o mesmo espaço horizontal, ou seja, se partilham do mesmo eixo vertical. De seguida é ajustada a altura da esfera inferior de modo a ter a certeza que as esferas encontram-se nas distâncias especificadas na norma.

De acordo com a norma [46], o método standard de espaçamento de esferas é um método que requer a medida do pico da tensão. Os pontos mais próximos de ambas as esferas são os pontos entre os quais vai ocorrer o contornamento, que devem estar secos e limpos. Além de perfeitamente alinhadas, as esferas têm de ter o mesmo diâmetro, não devendo este diferenciar mais do que 2% do valor nominal. A superfície devem ser suave e a sua curvatura o mais uniforme possível, tendo especial atenção nos pontos de contornamento. A tolerância no tamanho e forma devem ser verificadas aquando da aquisição do material. O ponto de contornamento deve estar devidamente isolado e devidamente distanciado de outros materiais de modo a não causar interferências na calibração do equipamento. Na imagem seguinte podemos ver alguns valores para distâncias de segurança tendo em conta parâmetros como o diâmetro da esfera (D), o espaço entre esferas (S), a altura da esfera carregada (A) e a distância até objetos exteriores (B).

Sphere diameter D cm	Minimum value of height A	Maximum value of height A	Minimum value of distance B
Up to 6,25	$7 D$	$9 D$	$14 S$
10 -15	$6 D$	$8 D$	$12 S$
25	$5 D$	$7 D$	$10 S$
50	$4 D$	$6 D$	$8 S$
75	$4 D$	$6 D$	$8 S$
100	$3,5 D$	$5 D$	$7 S$
150	$3 D$	$4 D$	$6 S$
200	$3 D$	$4 D$	$6 S$

Figura 5.1: Limites de segurança do espinterómetro

Uma esfera deve estar ligada diretamente à terra. Para prevenir oscilações elétricas nas esferas, deve ser adicionada uma resistência entre $0.1M\Omega$ e $1M\Omega$ no circuito que alimenta as esferas.

Na calibração de equipamento de leitura de frequência industrial, a tensão neste ensaio deve ser aplicada com uma amplitude baixa o suficiente para não causar nenhuma descarga quando é fornecida energia quando a carga está a ser alimentada, devendo ser aumentada suficientemente devagar para o indicador de tensão poder ler com precisão os valores na descarga. Um mínimo de dez descargas sucessivas devem ser registadas de modo a que seja possível avaliar o valor médio da tensão sendo possível este valor ter um desvio no máximo de 1%. O intervalo entre ensaios não deve ser inferior a 30 segundos. Na calibração do equipamento de choque, o valor standard de desvio da tensão não deve ser superior a 1.5% .

Os valores da descarga, valores *standard* de temperatura e pressão são os mesmo que os referidos no Capítulo 2. Os valores em anexo têm um nível de incerteza estimado de 3% e um nível de confiança não inferior a 95%. O valor de densidade do ar δ é definido por:

$$\delta = \frac{b}{b_0} \times \frac{273 + t_0}{273 + t}$$

Onde b e b_0 referem-se ao valor da pressão medida e da pressão *standard* respetivamente, enquanto que t e t_0 referem-se ao valor da temperatura medida e da temperatura *standard* respetivamente.

O valor da descarga aumenta 0.2% por gm^{-3} . O valor médio da humidade (h) é considerado como sendo $8.5 gm^{-3}$. Os valores de humidade podem ser corrigidos multiplicando os valores das tabelas pelo factor de correção de humidade k :

$$k = 1 + (0.002(\frac{h}{\delta} - 8.5))$$

Para determinar o erro de uma medição utiliza-se a seguinte equação:

$$erro(\%) = |1 - \frac{V_{ref}}{V_{corrigida}}| \times 100$$

[18] [46] .

5.1.1 Frequência Industrial

Estes ensaios foram feitos de acordo com as normas mencionadas na secção do capítulo anterior. Antes de dar início a cada ensaio foram registadas as condições atmosféricas relevantes. Os ensaios são distintos pela distância entre as esferas.

É importante não esquecer que o valor da tensão de pico é um valor eficaz, ou seja, para obter o valor da tensão de pico torna-se necessário multiplicar o valor lido por $\sqrt{2}$ [46].

5.1.1.1 Ensaio com Distância Entre Esferas de 24 mm

Neste ensaio foi utilizada uma distância entre esferas de 24 mm. Para esta distância a tensão de referencia é de 70 kV. Para o cálculo do erro do ensaio foram anotadas as condições atmosféricas existentes.

Tabela 5.1: Condições atmosféricas para calibração à frequência industrial para 24 mm

Condições Atmosféricas		Unidades
Temperatura	12.9	°C
Humidade Relativa	60	%
Pressão Atmosférica	1013	mbar

Após 10 ensaios obtivemos uma tensão média, sendo VL o valor lido pelo equipamento e VP o valor de pico.

Tabela 5.2: Resultados da calibração à frequência industrial para 24 mm

Ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
VL(kV)	51	51	51	51	51	51	50.5	50.5	51	51
VP(kV)	72.1	72.1	72.1	72.1	72.1	72.1	71.4	71.4	72.1	72.1

A partir dos valores obtidos, calculamos a média dos valores de pico, cujo resultado é 71.983 kV. De seguida aplicamos as correções atmosféricas à média do valor de pico obtendo assim 70.239 kV, com um erro de 0.33984% estando este valor no intervalo de tolerância para estes testes.

5.1.1.2 Ensaio com Distância Entre Esferas de 60 mm

Neste ensaio foi utilizada uma distância entre esferas de 60 mm. Para esta distância a tensão de referencia é de 164 kV. Para o cálculo do erro do ensaio foram anotadas as condições atmosféricas existentes.

Tabela 5.3: Condições atmosféricas para a calibração à frequência industrial para 60 mm

Condições Atmosféricas		Unidades
Temperatura	13.2	°C
Humidade Relativa	59	%
Pressão Atmosférica	1013	mbar

Após 10 ensaios obtivemos uma tensão média.

Tabela 5.4: Resultados da calibração à frequência industrial para 60 mm

Ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
VL(kV)	119.5	120	119	119	120	120	119.5	120	120	120
VP(kV)	169	169.7	168.3	168.3	169.7	169.7	169	169.7	169.7	169.7

A partir dos valores obtidos, calculamos a média dos valores de pico, cujo resultado é 169.3 kV.

De seguida aplicamos as correções atmosféricas à média do valor de pico obtendo assim 165.35 kV, tendo assim um erro de 0.81806% estando este valor no intervalo de tolerância para estes testes.

5.1.1.3 Ensaio com Distância Entre Esferas de 150 mm

Neste ensaio foi utilizada uma distância entre esferas de 150 mm. Para esta distância a tensão de referencia é de 387 kV. Para o cálculo do erro do ensaio foram anotadas as condições atmosféricas existentes.

Tabela 5.5: Condições atmosféricas para a calibração à frequência industrial para 150 mm

Condições Atmosféricas		Unidades
Temperatura	14.9	°C
Humidade Relativa	75	%
Pressão Atmosférica	1006	mbar

Após 10 ensaios obtivemos uma tensão média.

Tabela 5.6: Resultados da calibração à frequência industrial para 150 mm

Ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
VL(kV)	278	2790	281	281	280	280	281	278	281	279
VP(kV)	393.2	394.6	397.4	397.4	396	396	397.4	393.2	397.4	394.6

A partir dos valores obtidos, calculamos a média dos valores de pico, cujo resultado é 395.7 kV. De seguida aplicamos as correções atmosféricas à média do valor de pico obtendo assim

391.51 kV, tendo assim um erro de 1.15318% estando este valor no intervalo de tolerância para estes testes.

5.1.2 Choque

Antes de dar início a cada ensaio, foram registadas as condições atmosféricas relevantes. Os ensaios são distintos pela distância entre as esferas. Um fator importante é a necessidade de testar com polaridades negativas e positivas. Nestes ensaios que se seguem recorreu-se ao método Up and Down [46].

5.1.2.1 Ensaio com Polaridade Positiva com Distância Entre Esferas de 60 mm

Neste ensaio foi utilizada uma distância de 60 mm com polaridade positiva. Para esta distância a tensão de referencia é de 164 kV. Para o cálculo do erro do ensaio foram anotadas as condições atmosféricas existentes.

Tabela 5.7: Condições atmosféricas na calibração ao choque (+) para 60 mm

Condições Atmosféricas		Unidades
Temperatura	12	°C
Humidade Relativa	50	%
Pressão Atmosférica	1007	mbar

Seguidamente podemos observar uma representação gráfica dos resultados dos 20 ensaios.

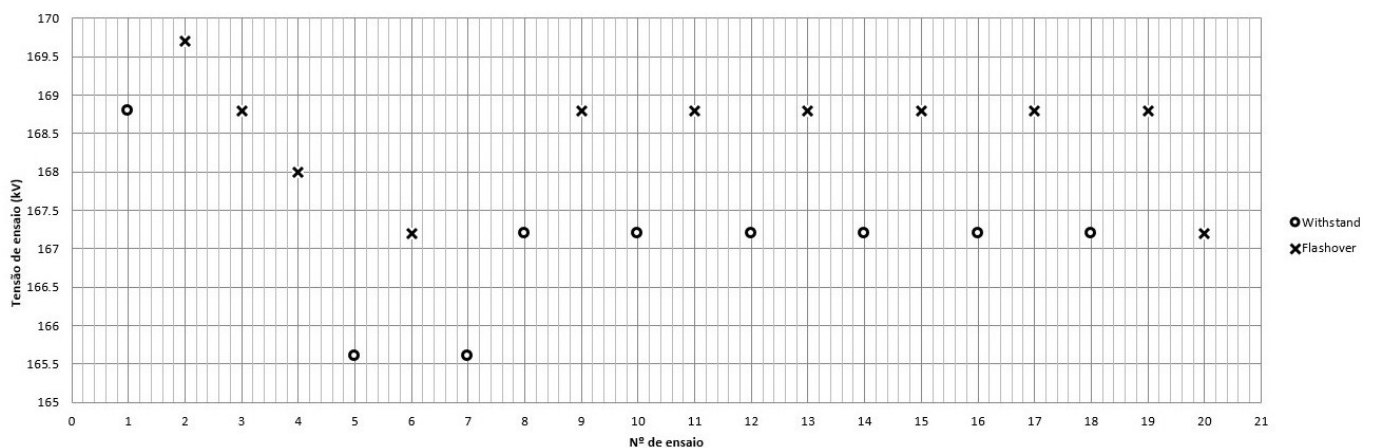


Figura 5.2: Resultados do ensaio(+) com espaçamento 60 mm

Após 20 ensaios obtivemos uma tensão de pico média no valor de 167,73 kV.

De seguida aplicamos as correções atmosféricas à média do valor de pico obtendo assim 164.12 kV, tendo assim um erro de 0.0746% estando este valor no intervalo de tolerância para estes testes.

5.1.2.2 Ensaio com Polaridade Positiva com Distância Entre Esferas de 100 mm

Neste ensaio foi utilizada uma distância de 100 mm com polaridade positiva. Para esta distância a tensão de referencia é de 265 kV. Para o cálculo do erro do ensaio foram anotadas as condições atmosféricas existentes.

Tabela 5.8: Condições atmosféricas para a calibração ao choque (+) para 100mm

Condições Atmosféricas		Unidades
Temperatura	11.8	°C
Humidade Relativa	51	%
Pressão Atmosférica	1007	mbar

Seguidamente podemos observar uma representação gráfica dos resultados dos 20 ensaios.

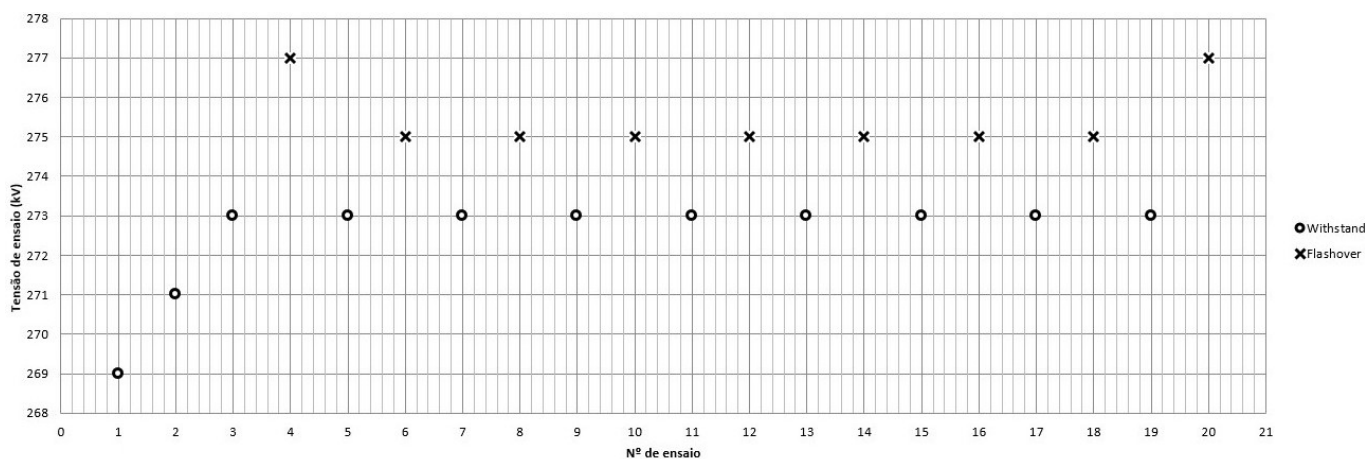


Figura 5.3: Resultados do ensaio (+) com espaçamento de 100 mm

Após 20 ensaios obtivemos uma tensão de pico média no valor de 274.22 kV.

De seguida aplicamos as correções atmosféricas à média do valor de pico obtendo assim 268.134 kV, tendo assim um erro de 1.169% estando este valor no intervalo de tolerância para estes testes.

5.1.2.3 Ensaio com Polaridade Positiva com Distância Entre Esferas de 140 mm

Neste ensaio foi utilizada uma distância de 140 mm com polaridade positiva. Para esta distância a tensão de referência é de 363 kV. Para o cálculo do erro do ensaio foram anotadas as condições atmosféricas existentes.

Tabela 5.9: Condições atmosféricas para a calibração ao choque (+) para 140 mm

Condições Atmosféricas		Unidades
Temperatura	11.4	°C
Humidade Relativa	52	%
Pressão Atmosférica	1006	mbar

Seguidamente podemos observar uma representação gráfica dos resultados dos 20 ensaios.

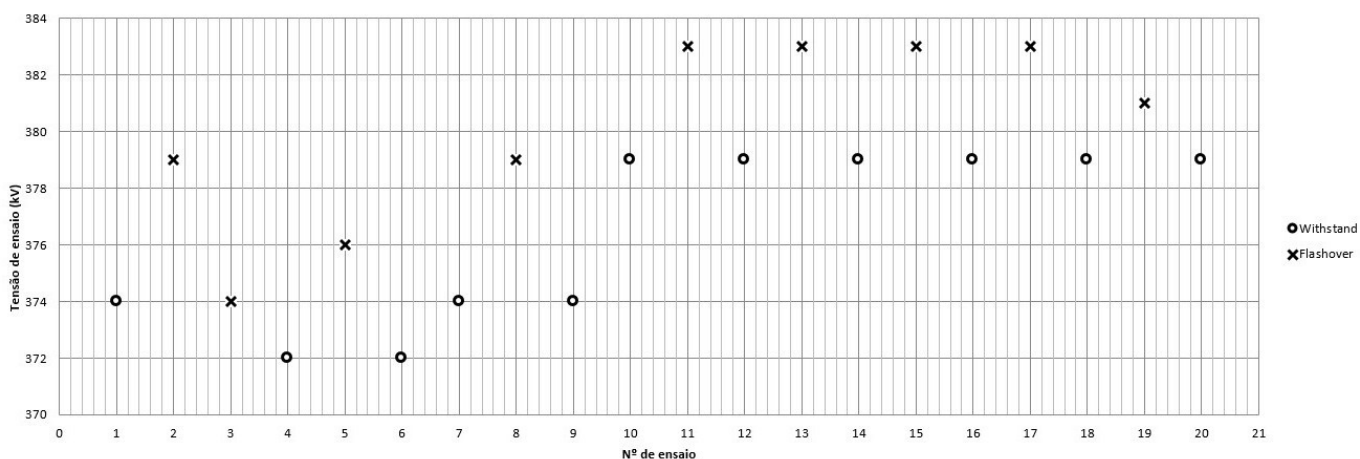


Figura 5.4: Resultados do ensaio (+) com espaçamento de 140 mm

Após 20 ensaios obtivemos uma tensão de pico média no valor de 378 kV.

De seguida aplicamos as correções atmosféricas à média do valor de pico obtendo assim 369.4581372 kV, tendo assim um erro de 1.748% estando este valor no intervalo de tolerância para estes testes.

5.1.2.4 Ensaio com Polaridade Negativa com Distância Entre Esferas de 60 mm

Neste ensaio foi utilizada uma distância de 60 mm com polaridade negativa. Para esta distância a tensão de referencia é de 164 kV. Para o cálculo do erro do ensaio foram anotadas as condições atmosféricas existentes.

Tabela 5.10: Condições atmosféricas para o ensaio de calibração ao choque (-) para 60 mm

Condições Atmosféricas		Unidades
Temperatura	13.8	°C
Humidade Relativa	56	%
Pressão Atmosférica	990	mbar

Seguidamente podemos observar uma representação gráfica dos resultados dos 20 ensaios.

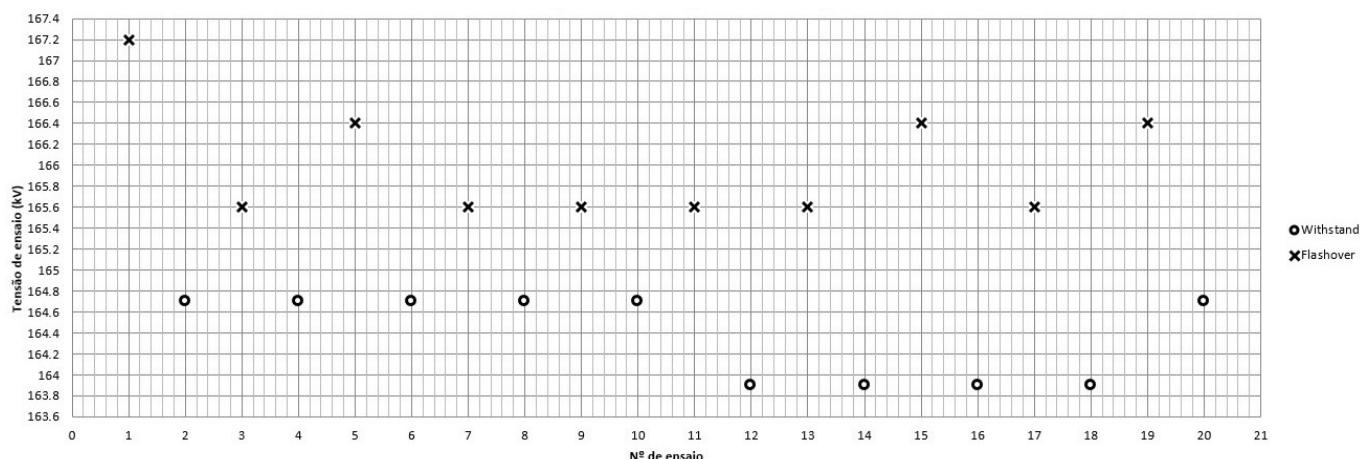


Figura 5.5: Resultados do ensaio (-) com espaçamento de 60 mm

Após 20 ensaios obtivemos uma tensão de pico média no valor de 165.08 kV. De seguida aplicamos as correções atmosféricas à média do valor de pico obtendo assim 165.341 kV, tendo assim um erro de 0.811% estando este valor no intervalo de tolerância para estes testes.

5.1.2.5 Ensaio com Polaridade Negativa com Distância Entre Esferas de 100 mm

Neste ensaio foi utilizada uma distância de 100 mm com polaridade negativa. Para esta distância a tensão de referencia é de 265 kV. Para o cálculo do erro do ensaio foram anotadas as condições atmosféricas existentes.

Tabela 5.11: Condições atmosféricas para o ensaio de calibração ao choque (-) para 100mm

Condições Atmosféricas		Unidades
Temperatura	13.8	°C
Humidade Relativa	55	%
Pressão Atmosférica	991	mbar

Seguidamente podemos observar uma representação gráfica dos resultados dos 20 ensaios.

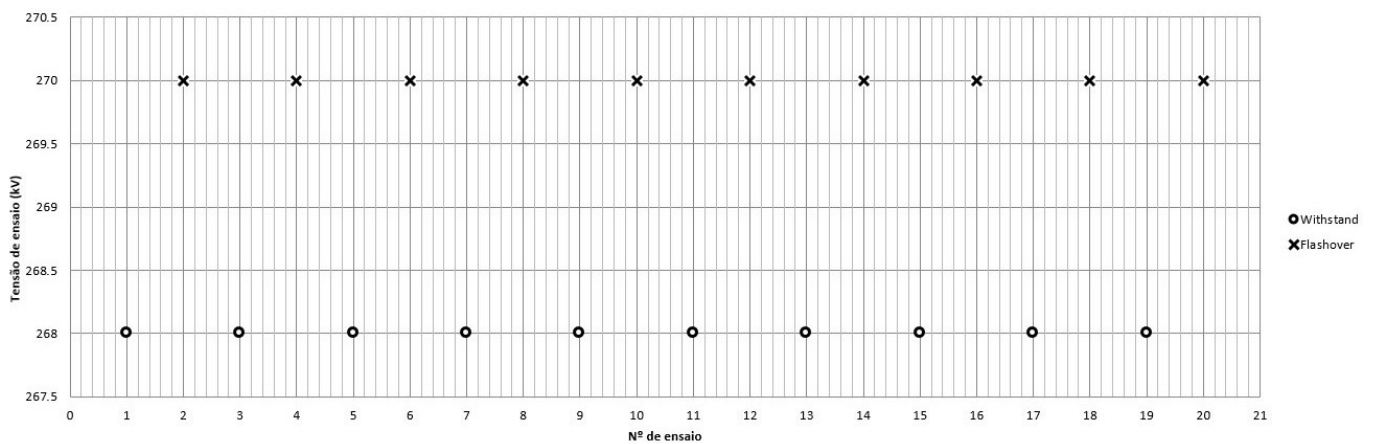


Figura 5.6: Resultados do ensaio (-) com espaçamento de 100 mm

Após 20 ensaios obtivemos uma tensão de pico média no valor de 269 kV.

De seguida aplicamos as correções atmosféricas à média do valor de pico obtendo assim 269.15 kV, tendo assim um erro de 1.543% estando este valor no intervalo de tolerância para estes testes.

5.1.2.6 Ensaio com Polaridade Negativa com Distância Entre Esferas de 140 mm

Neste ensaio foi utilizada uma distância de 140 mm com polaridade negativa. Para esta distância a tensão de referencia é de 363 kV. Para o cálculo do erro do ensaio foram anotadas as condições atmosféricas existentes.

Tabela 5.12: Condições atmosféricas para o ensaio de calibração ao choque (-) para 140mm

Condições Atmosféricas		Unidades
Temperatura	13.7	°C
Humidade Relativa	54	%
Pressão Atmosférica	992	mbar

Seguidamente podemos observar uma representação gráfica dos resultados dos 20 ensaios.

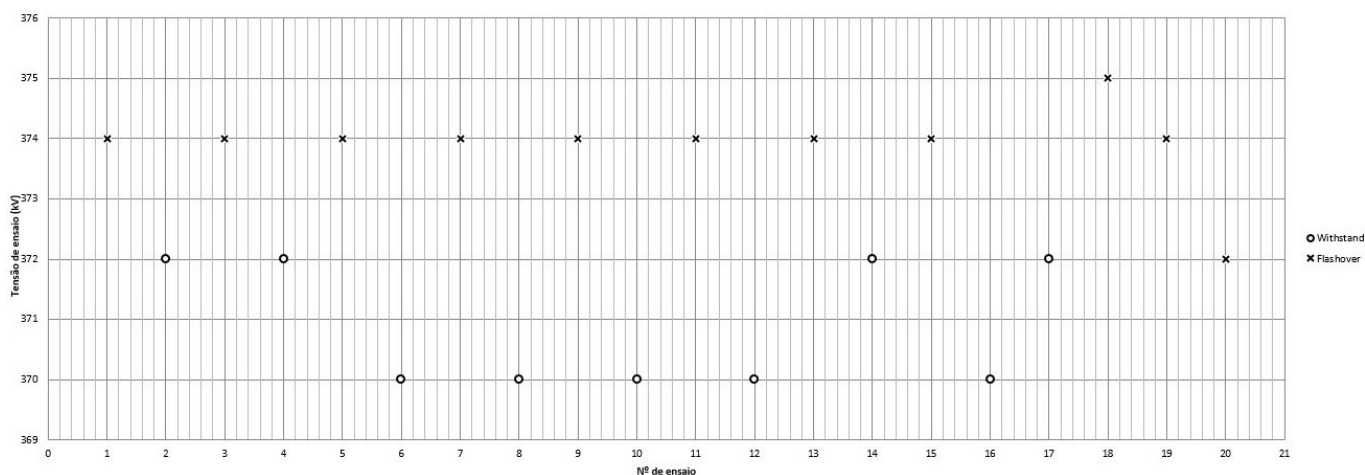


Figura 5.7: Resultados do ensaio (-) com espaçamento de 140 mm

Após 20 ensaios obtivemos uma tensão de pico média no valor de 372.42 kV.

De seguida aplicamos as correções atmosféricas à média do valor de pico obtendo assim 372.127 kV, tendo assim um erro de 2.453% estando este valor no intervalo de tolerância para estes testes.

5.2 Conclusão

Os ensaios foram realizados de modo a verificar se eram efetivamente cumpridos os valores estipulados pela norma IEC 60060-1 [42]. Foram feitos ensaios de calibração à frequência industrial e ao choque, visto estes serem os equipamentos que vão ser utilizados na tese.

De acordo com os ensaios efetuados, é possível chegar à conclusão que o equipamento se encontra calibrado, podendo isto ser atribuído a uma boa e regular manutenção e utilização dos equipamentos presentes, estando estes perfeitamente preparados para fazer as atividades de ensaio que serão expostas em capítulos posteriores. Contudo, é importante fazer calibrações regulares, visto o último ensaio ter um desvio de aproximadamente 2.5% sendo este valor muito próximo do limite estipulado pela de 3%.

Capítulo 6

Ensaio e Análise dos Procedimentos

6.1 Introdução

Dos três pólos do seccionador, apenas foram montados dois pares de pólos, sendo desnecessário montar o terceiro por questões de redundância. Os pólos podem estar abertos ou fechados.

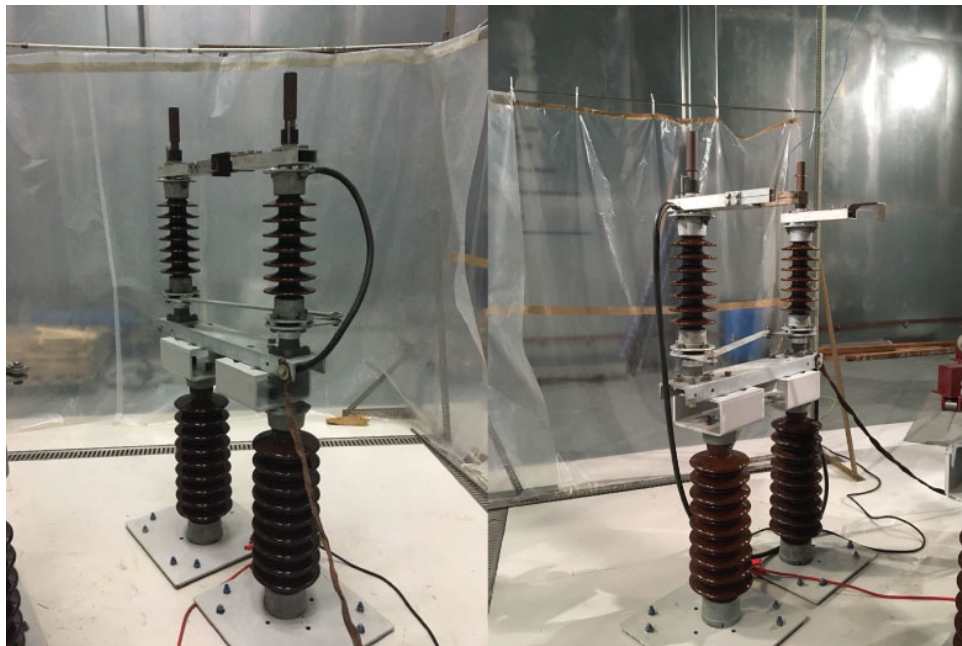


Figura 6.1: Par de pólos fechado (à esquerda) e par de pólos aberto (à direita)

Enquanto estão fechados, pode ser constatado que os quatro pólos estão ligados dois a dois, nomeadamente o pólo A ligado com o pólo a, formando o par de pólos A-a e o pólo B ligado com o pólo b, formando o par de pólos B-b. Os ensaios foram subdivididos em ensaios fase-terra, fase-fase e de seccionamento. De seguida é apresentado um esquema que explica a estrutura em estudo.

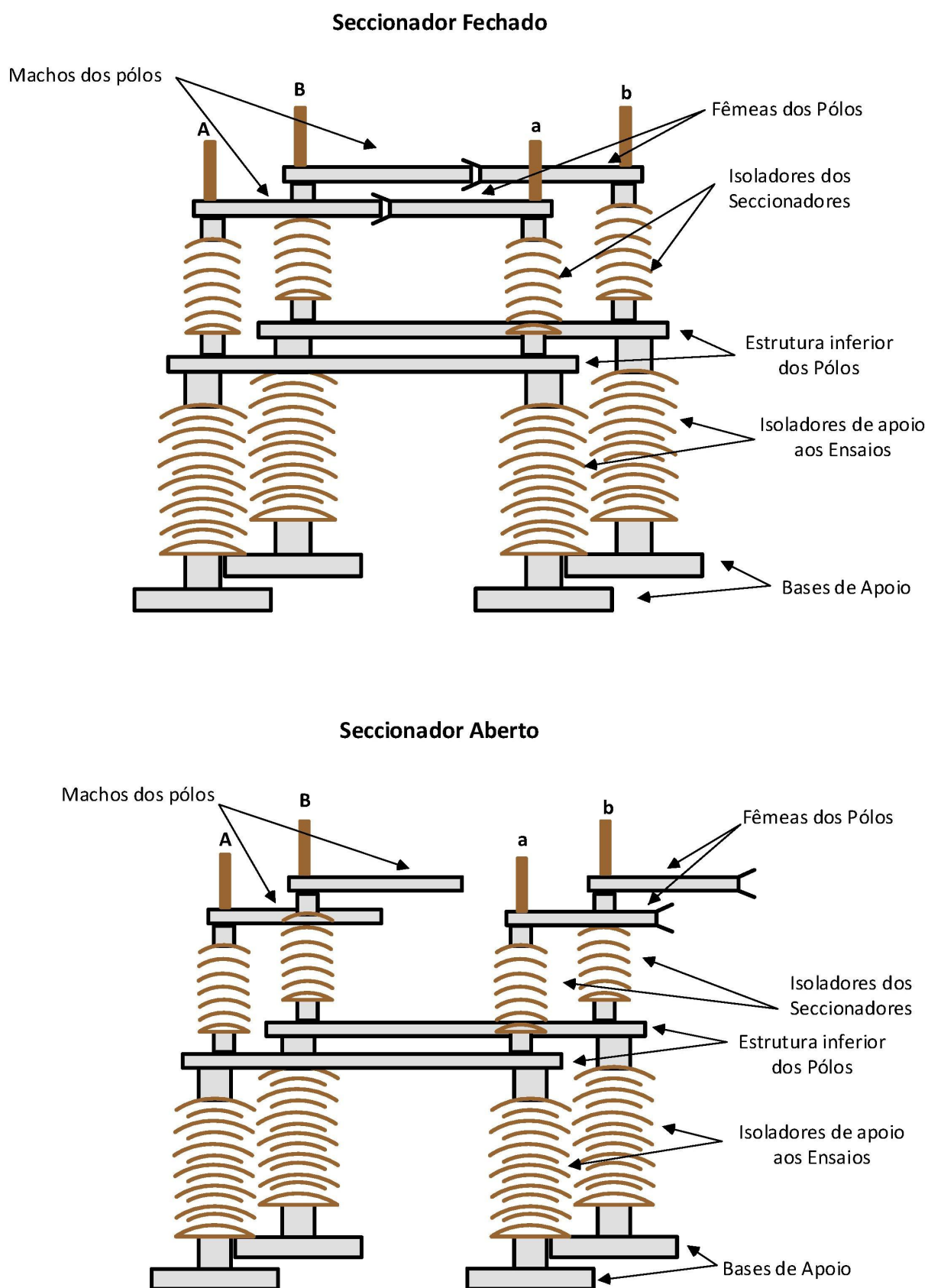


Figura 6.2: Esquema de um seccionador aberto e fechado

6.1.1 Características do Seccionador

Antes de começar a testar o seccionador é necessário verificar as características do equipamento. Normalmente estas são fornecidas pelo empresa em questão. Neste caso esse documento não foi facultado, contudo foi possível recorrer à chapa de características presente no equipamento para obter a informação necessária.



Figura 6.3: Chapa de características dos seccionadores

Como podemos ver na chapa de características, este é um seccionador horizontal duplo que está dimensionado para uma tensão nominal de 36 kV, corrente nominal de 1250 A, tensão de pico de 170 kV e corrente de pico de 40 kA, sendo capaz de sustentar a corrente de pico durante um tempo máximo de um segundo [18] [47] [48].

6.1.2 Fase-Fase

Nos ensaios fase-fase, os pólos encontram-se fechados, estando um dos pares a ser alimentado enquanto outro dos pares está ligado à terra. Encontram-se também ligados à terra os apoios a cada um dos pólos, tal como pode ser visto na figura seguinte [47].



Figura 6.4: Exemplo de uma ligação fase-fase

6.1.3 Fase-Terra

Nos ensaios fase-terra os pares de pólos encontram-se abertos, estando apenas um dos pólos a ser alimentado, enquanto todos os outros estão ligados à terra, bem como os respetivos apoios. Podemos observar uma montagem assim na figura seguinte [47].

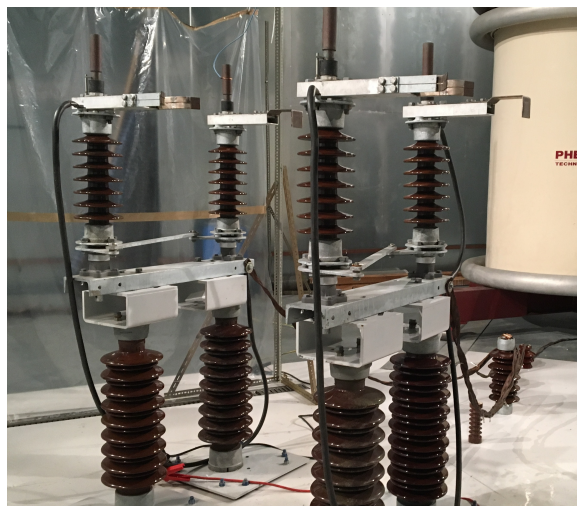


Figura 6.5: Exemplo de uma ligação fase-terra

6.1.4 Seccionamento

Nos ensaios ao seccionamento (ou ensaio isolado) os pares de pólos encontram-se abertos, estando apenas um dos pólos a ser alimentado, enquanto apenas o respetivo pólo par se encontra ligado à terra. Podemos observar uma montagem assim na figura seguinte [47].

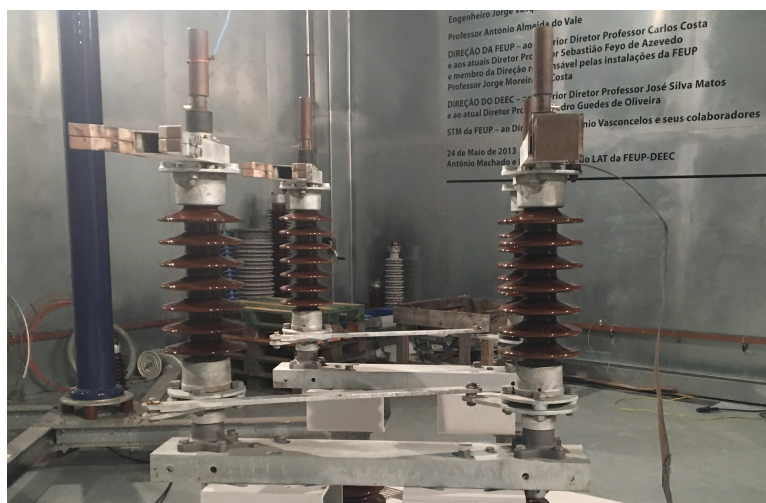


Figura 6.6: Exemplo de uma ligação num ensaio ao seccionamento

6.2 Ensaios à Frequência Industrial - Ensaios à Chuva

Os primeiros ensaios a serem feitos são os ensaios à frequência industrial devido à necessidade de calibrar previamente o equipamento de chuva que é utilizado em parte destes ensaios, procede-se a um pequeno teste, onde é verificado se o equipamento de simulação de chuva realmente cumpre as normas.

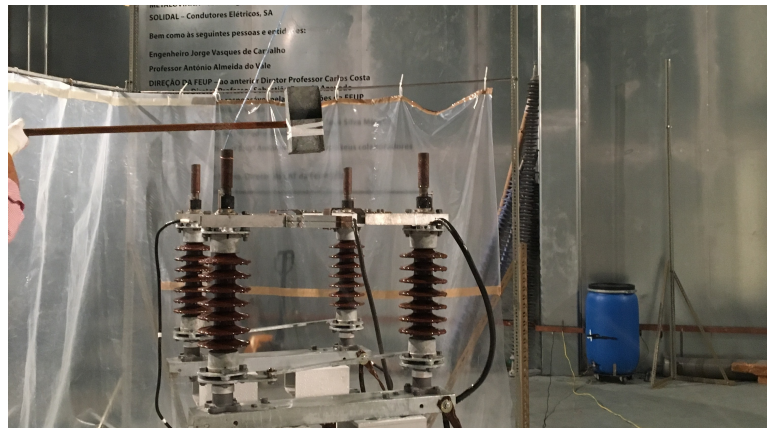


Figura 6.7: Calibração do ensaio à chuva

Após verificar-mos que a componente vertical correspondia a 1.5 mm/min e a componente horizontal correspondia a 1.8 mm/min, realizamos o ensaio fase-fase [47] [42].

6.2.1 Fase-Fase

No início do ensaios verificamos as condições atmosféricas.

Tabela 6.1: Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, à chuva numa ligação fase-fase

Condições Atmosféricas		Unidades
Temperatura	18.9	°C
Humidade Relativa	45	%
Pressão Atmosférica	1007	mbar
Componente Vertical	1.5	mm/min
Componente Horizontal	1.8	mm/min
Pressão da Água	1.9	bar

Os valores da pressão da bomba são anotados como um valor indicativo em caso de necessidade de replicação de ensaio.

De seguida, os equipamentos são submetidos a 71 kV cada durante 60 segundos, não tendo acontecido qualquer contornamento elétrico. Tendo em conta as correções atmosféricas, o valor a que foi submetido foi de 71 kV. A montagem deste ensaio pode ser vista no seguinte esquema.

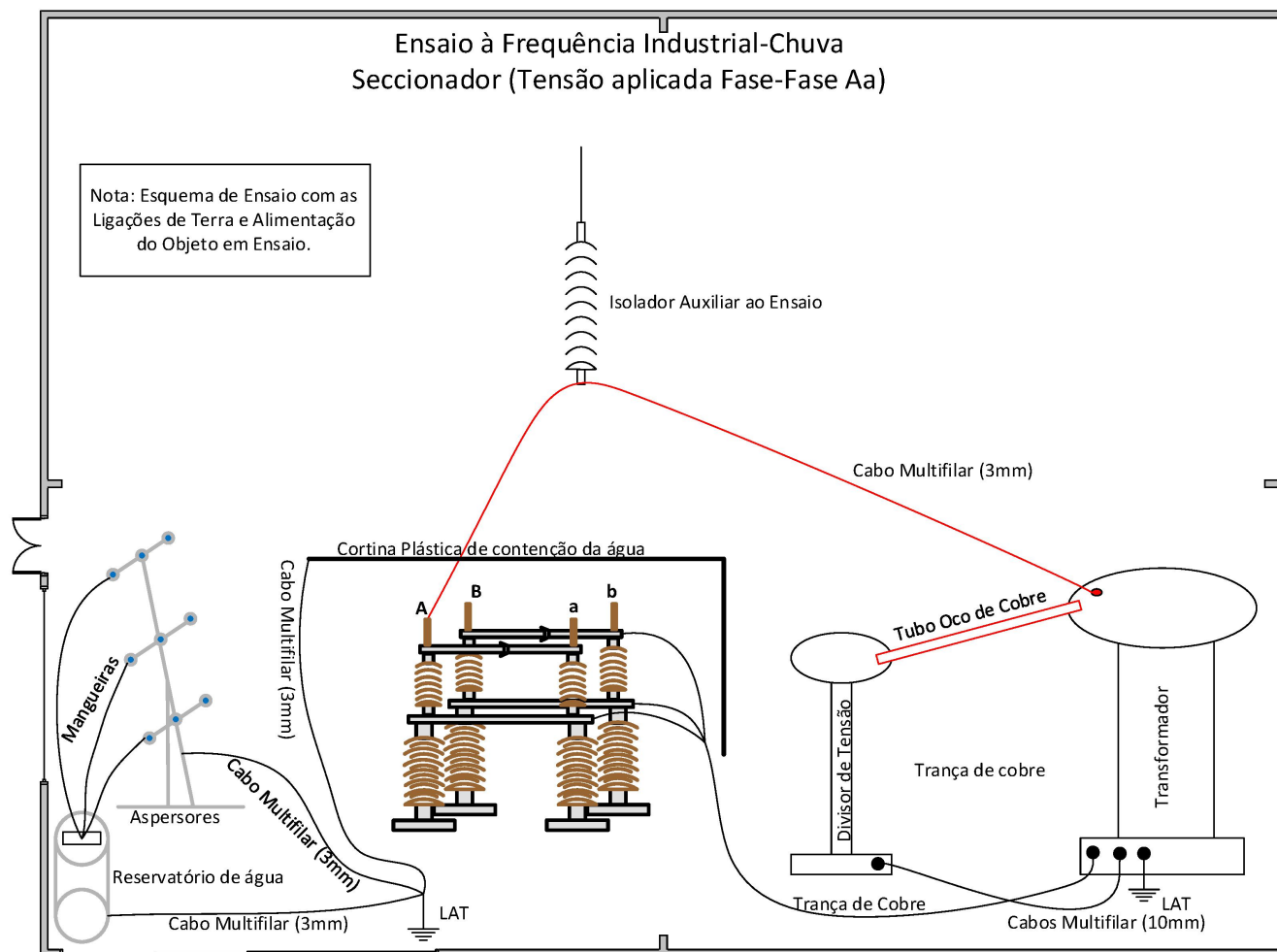


Figura 6.8: Esquema de ensaio à frequência industrial à chuva numa ligação fase-fase

6.2.2 Fase-Terra

Aqui foram novamente verificadas as condições de ensaios, com o intuito de assegurar a integridade dos resultados, tendo estes sido iguais aos medidos na Tabela 6.1.

Como é norma nos ensaios fase-terra, foram testados todos os pólos um a um, tendo sido submetidos a 70 kV, não tendo havido qualquer contornamento.

Tabela 6.2: Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, à chuva numa ligação fase-terra

Condições Atmosféricas		Unidades
Temperatura	18.9	°C
Humidade Relativa	45	%
Pressão Atmosférica	1007	mbar
Componente Vertical	1.5	mm/min
Componente Horizontal	1.8	mm/min
Pressão da Água	1.9	bar

Tendo em conta as correções atmosféricas, o valor a que foi submetido foi de 71 kV. Tendo em conta as correções atmosféricas, o valor a que foi submetido foi de 71 kV. A montagem deste ensaio pode ser vista no seguinte esquema.

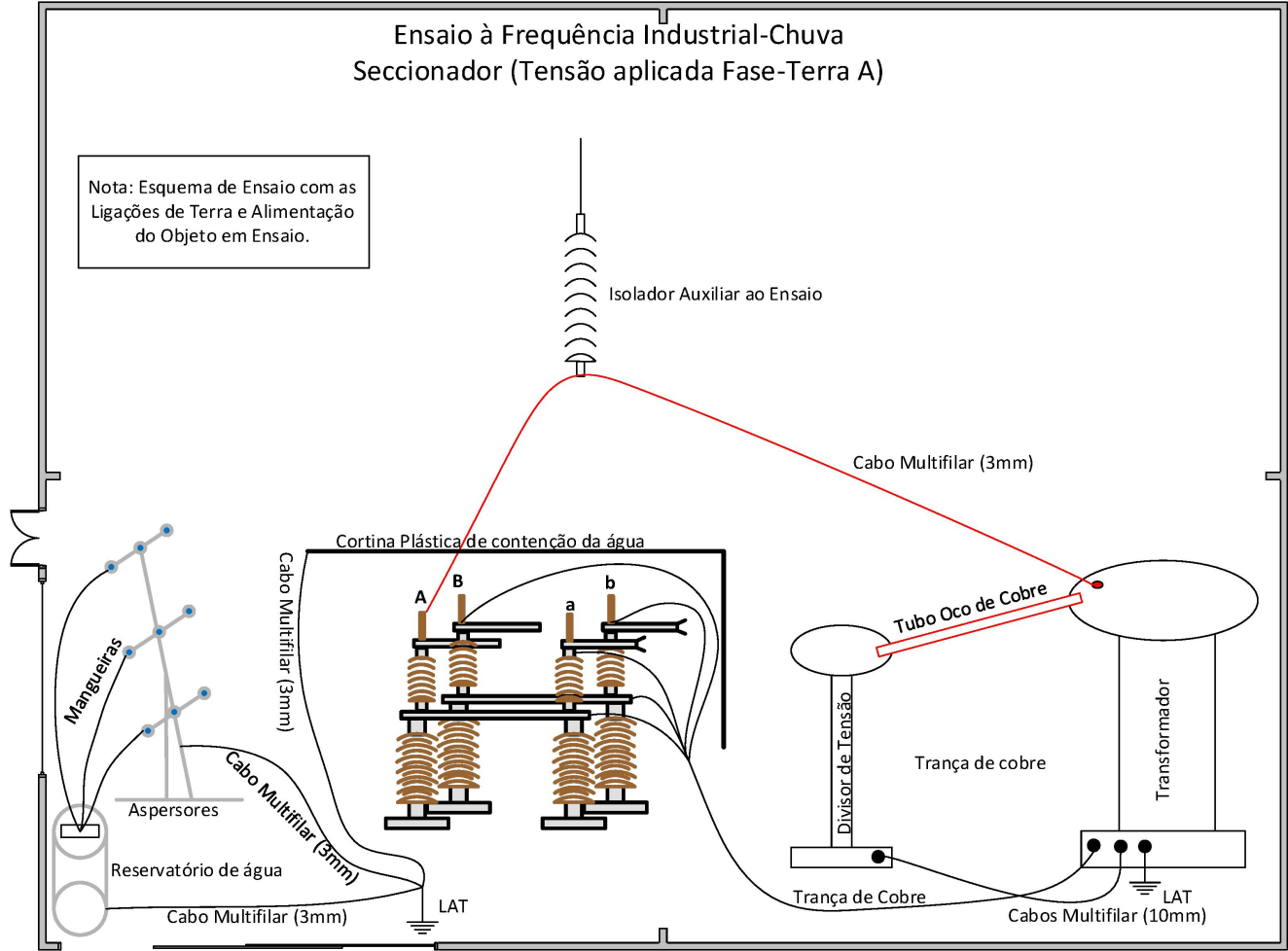


Figura 6.9: Esquema de ensaio à frequência industrial à chuva numa ligação fase-terra

6.2.3 Seccionamento

A montagem deste ensaio pode ser vista no seguinte esquema.

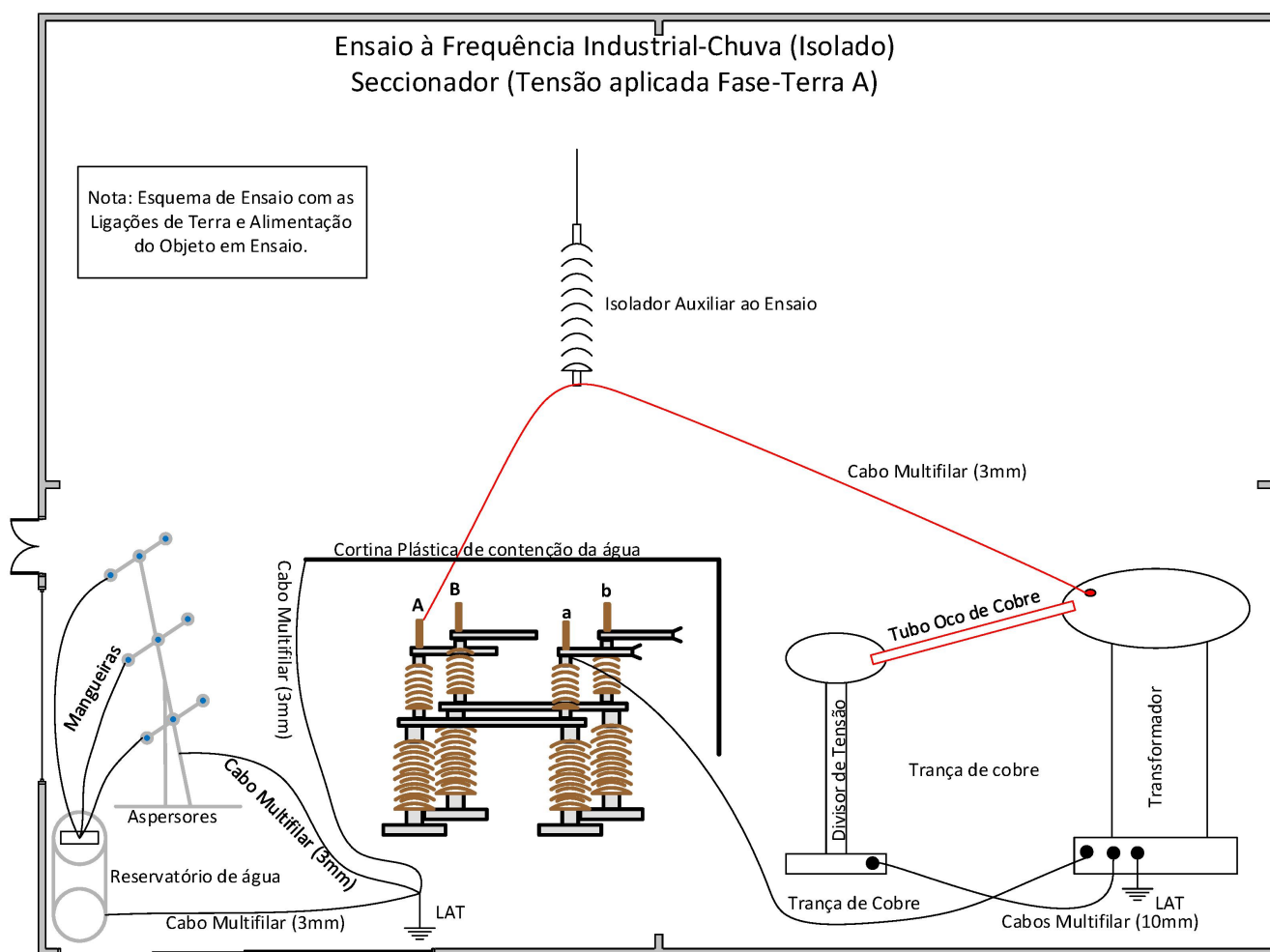


Figura 6.10: Esquema de ensaio à frequência industrial à chuva numa ligação de seccionamento

Devido ao tempo despendido em efetuar as ligações características deste tipo de ensaio, os valores das condições atmosféricas foram alterados, sendo os valores que seguem, os registados para este ensaio.

Tabela 6.3: Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, à chuva numa ligação de seccionamento

Condições Atmosféricas		Unidades
Temperatura	19.7	°C
Humidade Relativa	48	%
Pressão Atmosférica	1014	mbar
Componente Vertical	1.4	mm/min
Componente Horizontal	1.7	mm/min
Pressão da Água	1.8	bar

Como é norma nos ensaios ao seccionamento foram testados todos os pólos um a um, tendo sido submetidos a 80 kV, não tendo sido detetado qualquer contornamento. Tendo em conta as correções atmosféricas, o valor a que foi submetido foi de 80.3 kV.

6.3 Ensaios à Frequência Industrial - Ensaios a Seco

Após os ensaios à chuva serem feitos, são feitos os ensaios a seco, visto ser apenas necessário desligar o equipamento de simulação de chuva, bem como secar o chão de modo a diminuir os efeitos que a humidade causada pela simulação de chuva teria nos resultados. Estes segundos ensaios decorreram tanto no próprio dia dos ensaios à chuva (seccionamento), bem como no dia seguinte (fase-terra e fase-fase).

6.3.1 Seccionamento

Antes de iniciar o ensaio, regista-se os valores das condições atmosféricas, sendo os seguintes valores para este ensaio.

Tabela 6.4: Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, a seco numa ligação de seccionamento

Condições Atmosféricas		Unidades
Temperatura	19.7	°C
Humidade Relativa	48	%
Pressão Atmosférica	1014	mbar

Como é norma nos ensaios ao seccionamento foram testados todos os pólos um a um, tendo sido submetidos a 80 kV, não tendo sido detetado qualquer contornamento. Tendo em conta as correções atmosféricas, o valor a que foi submetido foi de 80 kV.

A montagem deste ensaio pode ser vista no seguinte esquema.

Como é norma nos ensaios fase-terra foram testados todos os pólos um a um, tendo sido submetidos a 70 kV, não tendo sido detetado qualquer contornamento. A montagem deste ensaio pode ser vista no seguinte esquema. Tendo em conta as correções atmosféricas, o valor a que foi submetido foi de 70 kV.

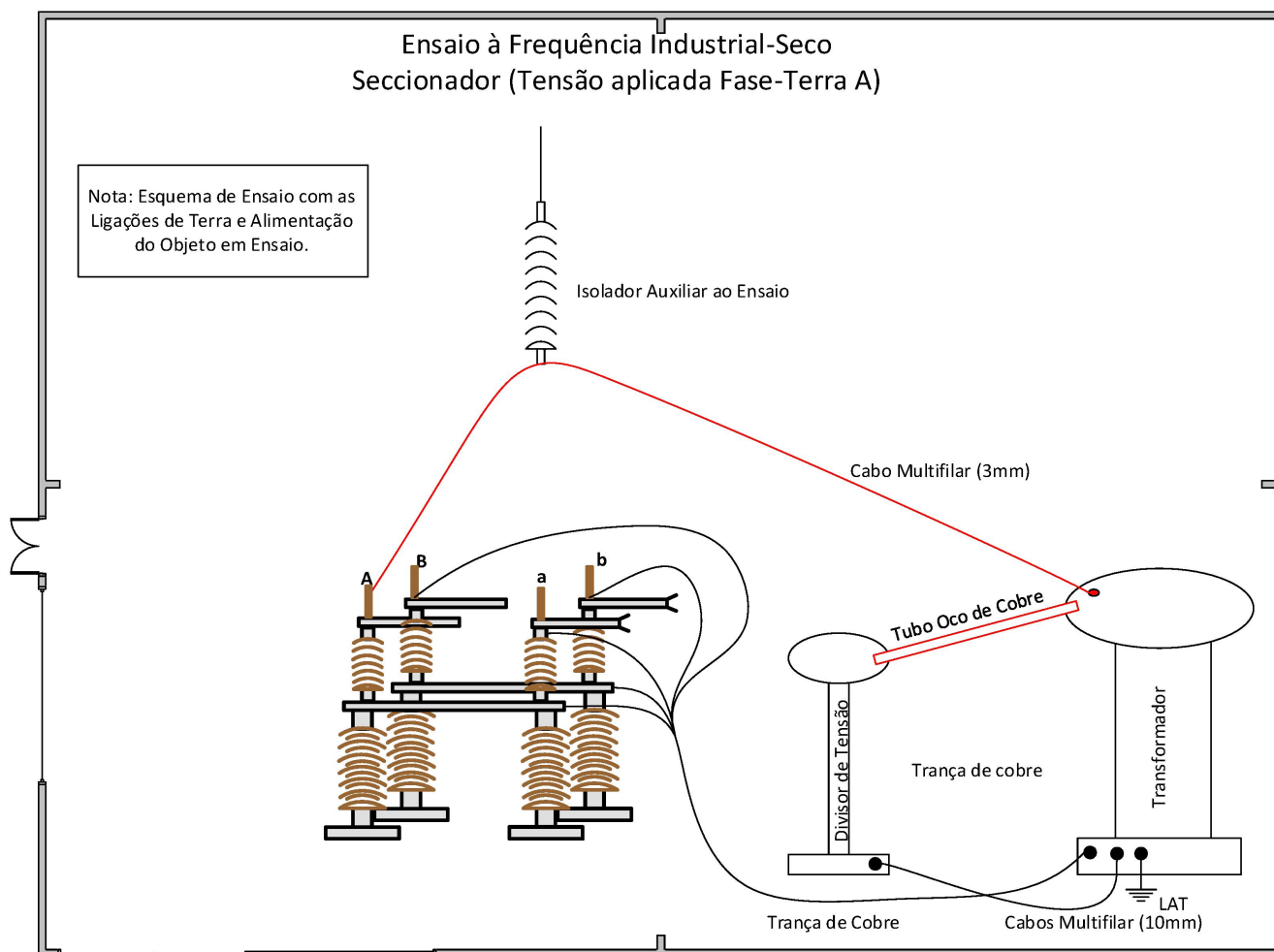


Figura 6.12: Esquema de ensaio à frequência industrial numa ligação fase-terra

6.3.3 Fase-Fase

Foram novamente registadas as condições de ensaios para verificar a integridade dos resultados. Os valores entre este ensaio e o anterior são iguais, podendo ser consultados na Tabela 6.1.

A montagem deste ensaio pode ser vista no seguinte esquema.

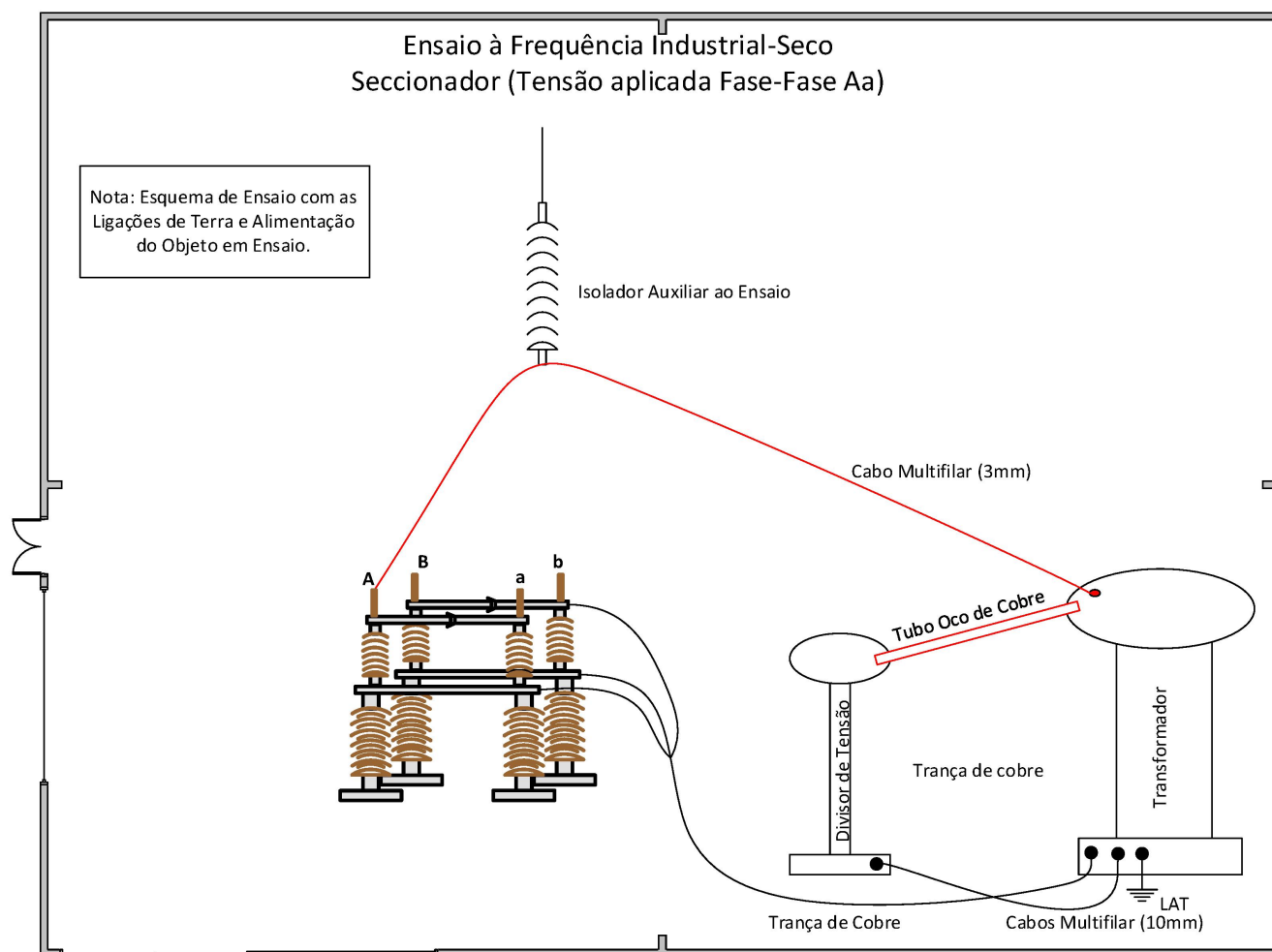


Figura 6.13: Esquema de ensaio à frequência industrial numa ligação fase-fase

Como é norma nos ensaios fase-fase foram, foram submetidos os equipamentos a 70 kV cada durante 60 segundos, não tendo sido detetado qualquer contornamento elétrico. Tendo em conta as correções atmosféricas, o valor a que foi submetido foi de 70 kV.

6.4 Ensaaios ao Choque

Seguidamente, foram preparadas todas as montagens necessárias para a ocorrência do ensaio ao choque. De notar que estes ensaios demoram mais tempo, visto haver necessidade de efetuar 15 repetições por ensaio com 2 polaridades diferentes. Naturalmente isto leva a um enorme número de resultados.

Tendo em conta os valores de tolerância, sabemos que os valores de tempo de frente têm de estar entre $0.84 \mu s$ e $1.56 \mu s$, o tempo de cauda têm de estar entre $40 \mu s$ e $60 \mu s$ e a tensão tem de estar entre 164.9 kV e 175.1 kV nos casos das montagens fase-terra e fase-fase e entre 184.785

kV e 196.215 kV nas montagens em seccionamento, contudo estes valores têm de ter ainda em consideração as correções atmosféricas [47] [42].

6.4.1 Fase-Fase

No início do ensaios retiramos as condições atmosféricas. Aqui, foram utilizados 3×54.1 kV.

Tabela 6.6: Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, a seco numa ligação fase-fase

Condições Atmosféricas		Unidades
Temperatura	17.8	°C
Humidade Relativa	53	%
Pressão Atmosférica	999	mbar

A montagem deste ensaio pode ser vista no seguinte esquema.

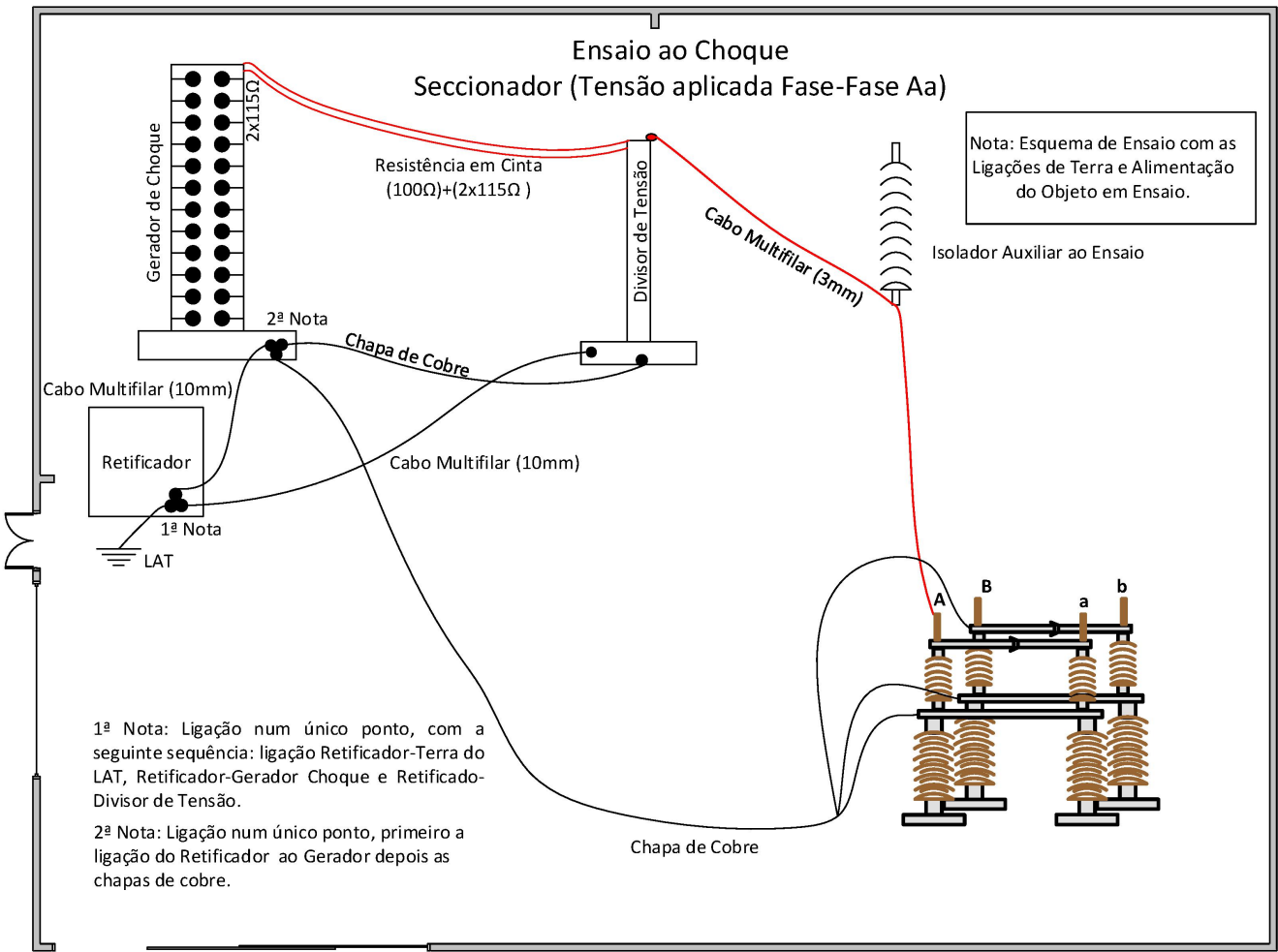


Figura 6.14: Esquema de ensaio ao choque frequência industrial numa ligação fase-fase

A média dos valores obtidos durante o ensaio são os seguintes, tendo em atenção os diferentes pares de pólos a serem alimentados e as respetivas polaridades.

Tabela 6.7: Média do tempo de frente, cauda e tensão em fase-fase (+) A-a

fase-fase + (A-a)		
Tempo de Frente μs	Tempo de Cauda μs	Tensão Medida kV
1.32	46.75	165.6

De acordo com as correções atmosféricas todos os valores obtidos encontram-se dentro do intervalo. Os resultados obtidos foram 166 kV e 164 kV que, de acordo com as correções atmosféricas, correspondem a 167.2 kV e 165.2 kV respetivamente. Trocando a polaridade do impulso foram obtidos os valores que constam na tabela 6.8.

Tabela 6.8: Média do tempo de frente, cauda e tensão em fase-fase (-) A-a

fase-fase - (A-a)		
Tempo de Frente μs	Tempo de Cauda μs	Tensão Medida kV
1.29	47.36	-166

De acordo com as correções atmosféricas todos os valores obtidos encontram-se dentro do intervalo. Todos os resultados foram de -166 kV que, de acordo com as correções atmosféricas, correspondem a -167.2 kV. De seguida foram feitos os mesmo ensaios para os pares de pólos B-b

Tabela 6.9: Média do tempo de frente, cauda e tensão em fase-fase (-) B-b

fase-fase - (B-b)		
Tempo de Frente μs	Tempo de Cauda μs	Tensão Medida kV
1.30	47.39	-166

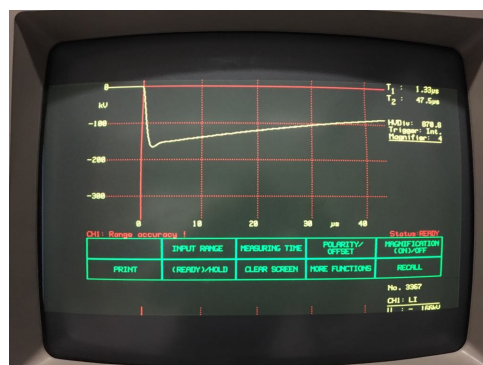


Figura 6.15: Display no ecrã do DIAS do ensaio fase-fase - (B-b) na sexta repetição

De acordo com as correções atmosféricas todos os valores obtidos encontram-se dentro do intervalo. Os resultados obtidos foram -166 kV que, de acordo com as correções atmosféricas, correspondem a -167.2 kV. Trocando a polaridade do impulso.

Tabela 6.10: Média do tempo de frente, cauda e tensão em fase-fase (+) B-b

fase-fase + (B-b)		
Tempo de Frente μs	Tempo de Cauda μs	Tensão Medida kV
1.31	46.58	165.07

De acordo com as correções atmosféricas todos os valores obtidos encontram-se dentro do intervalo. Os resultados obtidos foram 166 kV e 164 kV que, de acordo com as correções atmosféricas, correspondem a 167.2 kV e 165.2 kV respetivamente. Nestes ensaios não foi detetado qualquer contornamento.

6.4.2 Fase-Terra

No início do ensaios retiramos as condições atmosféricas. Aqui, foram utilizados 3×54.1 kV, ou seja estamos a utilizar três andares do gerador de Marx, cada um a produzir 54.1 kV.

Tabela 6.11: Condições atmosféricas pré ensaio ao choque, numa ligação fase-terra ao pólo b

Condições Atmosféricas		Unidades
Temperatura	18.2	°C
Humidade Relativa	53	%
Pressão Atmosférica	999	mbar

A média dos valores obtidos durante o ensaio são os seguintes, tendo em atenção os diferentes pólos a serem alimentados e as respetivas polaridades.

Tabela 6.12: Média do tempo de frente, cauda e tensão em fase-terra (+) b

fase-terra + (b)		
Tempo de Frente μs	Tempo de Cauda μs	Tensão Medida kV
1.33	46.75	165.47

A montagem deste ensaio pode ser vista no seguinte esquema.

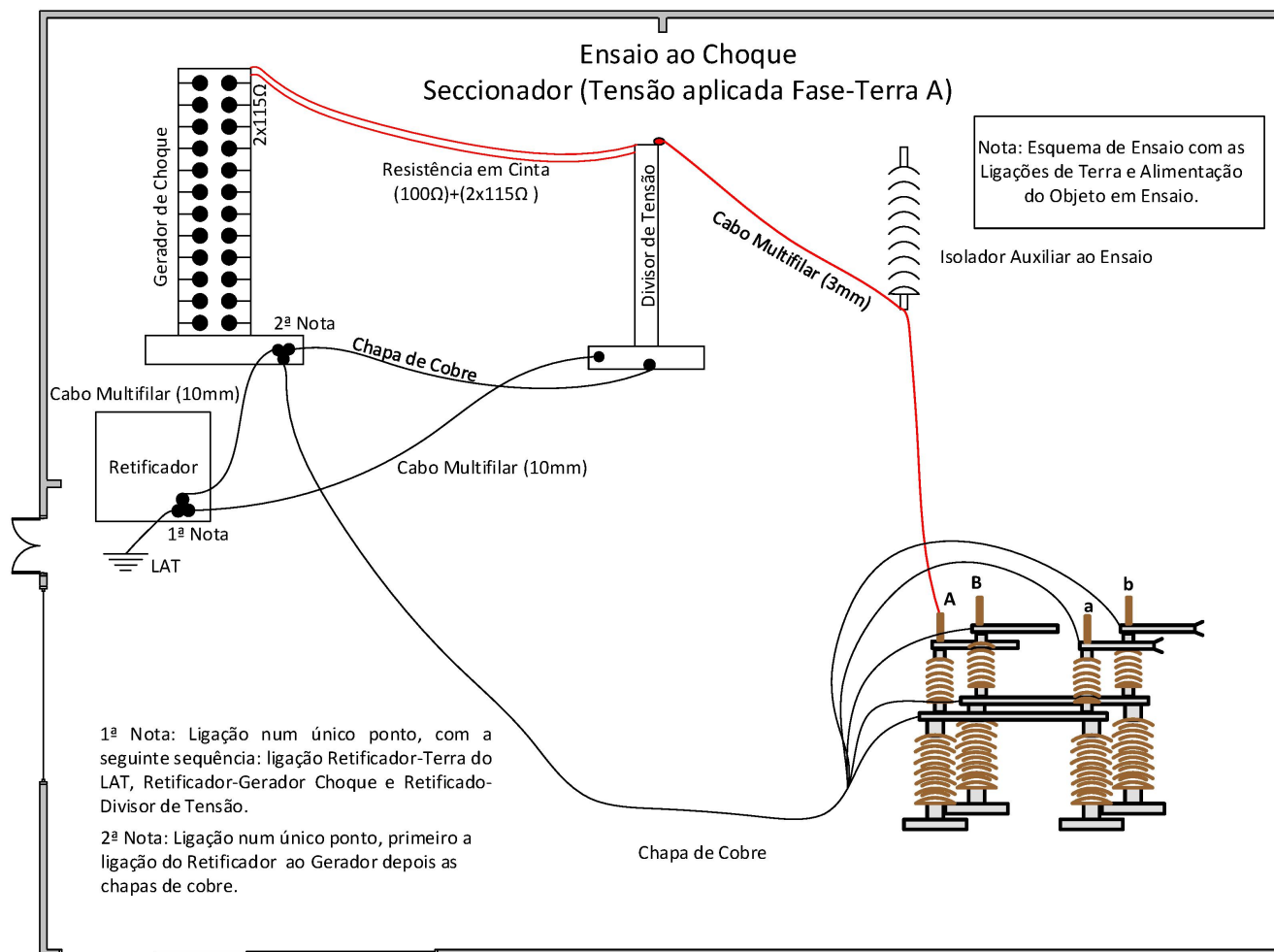


Figura 6.16: Esquema de ensaio ao choque numa ligação fase-terra

De acordo com as correções atmosféricas todos os valores obtidos encontram-se dentro do intervalo. Os resultados obtidos foram 166 kV e 164 kV que, de acordo com as correções atmosféricas, correspondem a 167.4 kV e 165.4 kV respetivamente. Trocando a polaridade do impulso.

Tabela 6.13: Média do tempo de frente, cauda e tensão em fase-terra (-) b

fase-terra - (b)		
Tempo de Frente μs	Tempo de Cauda μs	Tensão Medida kV
1.30	47.24	-166

De acordo com as correções atmosféricas todos os valores obtidos encontram-se dentro do intervalo. Os resultados obtidos foram -166 kV que, de acordo com as correções atmosféricas, correspondem a -167.4 kV respetivamente. De seguida foram feitos os mesmos ensaios para o pólo B.

Tabela 6.14: Média do tempo de frente, cauda e tensão em fase-terra (-) B

fase-terra - (B)		
Tempo de Frente μs	Tempo de Cauda μs	Tensão Medida kV
1.30	47.27	-166

De acordo com as correções atmosféricas todos os valores obtidos encontram-se dentro do intervalo. Os resultados obtidos foram -166 kV que, de acordo com as correções atmosféricas, correspondem a -167.4 kV. Trocando a polaridade do impulso.

Tabela 6.15: Média do tempo de frente, cauda e tensão em fase-terra (+) B

fase-terra + (B)		
Tempo de Frente μs	Tempo de Cauda μs	Tensão Medida kV
1.32	46.69	165.07

De acordo com as correções atmosféricas todos os valores obtidos encontram-se dentro do intervalo. Os resultados obtidos foram 166 kV e 164 kV que, de acordo com as correções atmosféricas, correspondem a 167.4 kV e 165.4 kV respetivamente. De seguida foram feitos os mesmo ensaios para o pólo A.

Tabela 6.16: Média do tempo de frente, cauda e tensão em fase-terra (+) A

fase-terra + (A)		
Tempo de Frente μs	Tempo de Cauda μs	Tensão Medida kV
1.31	46.45	164.53

De acordo com as correções atmosféricas todos os valores obtidos encontram-se dentro do intervalo. Os resultados obtidos foram 166 kV e 164 kV que, de acordo com as correções atmosféricas, correspondem a 167.4 kV e 165.4 kV respetivamente. Trocando a polaridade do impulso.

Tabela 6.17: Média do tempo de frente, cauda e tensão em fase-terra (-) A

fase-terra - (A)		
Tempo de Frente μs	Tempo de Cauda μs	Tensão Medida kV
1.30	47.22	-165.87

De acordo com as correções atmosféricas todos os valores obtidos encontram-se dentro do intervalo. Os resultados obtidos foram -166 kV e -164 kV que, de acordo com as correções atmosféricas, correspondem a -167.4 kV e -165.4 kV respetivamente. De seguida foram feitos os mesmo ensaios para o pólo a.

Tabela 6.18: Média do tempo de frente, cauda e tensão em fase-terra (-) a

fase-terra - (a)		
Tempo de Frente μs	Tempo de Cauda μs	Tensão Medida kV
1.30	47.22	-165.87

De acordo com as correções atmosféricas todos os valores obtidos encontram-se dentro do intervalo. Os resultados obtidos foram -166 kV e -164 kV que, de acordo com as correções atmosféricas, correspondem a -167.4 kV e -165.4 kV respetivamente. Trocando a polaridade de impulso, obtemos os seguintes valores enunciados na tabela abaixo.

Tabela 6.19: Média do tempo de frente, cauda e tensão em fase-terra (+) a

fase-terra + (a)		
Tempo de Frente μs	Tempo de Cauda μs	Tensão Medida kV
1.31	46.41	164.13

De acordo com as correções atmosféricas todos os valores obtidos encontram-se dentro do intervalo. Os resultados obtidos foram 166 kV e 164 kV que, de acordo com as correções atmosféricas, correspondem a 167.4 kV e 165.4 kV respetivamente. Nestes ensaios não foi detetado qualquer contornamento.

6.4.3 Seccionamento

No início do ensaios registamos as condições atmosféricas. Aqui, foram utilizados 3×62.9 kV, ou seja estamos a utilizar três andares do gerador de Marx, cada um a produzir 62.9 kV.

Tabela 6.20: Condições atmosféricas pré ensaio ao choque, numa ligação seccionamento

Condições Atmosféricas		Unidades
Temperatura	18.6	°C
Humidade Relativa	55	%
Pressão Atmosférica	999	mbar

A montagem deste ensaio pode ser vista no seguinte esquema.

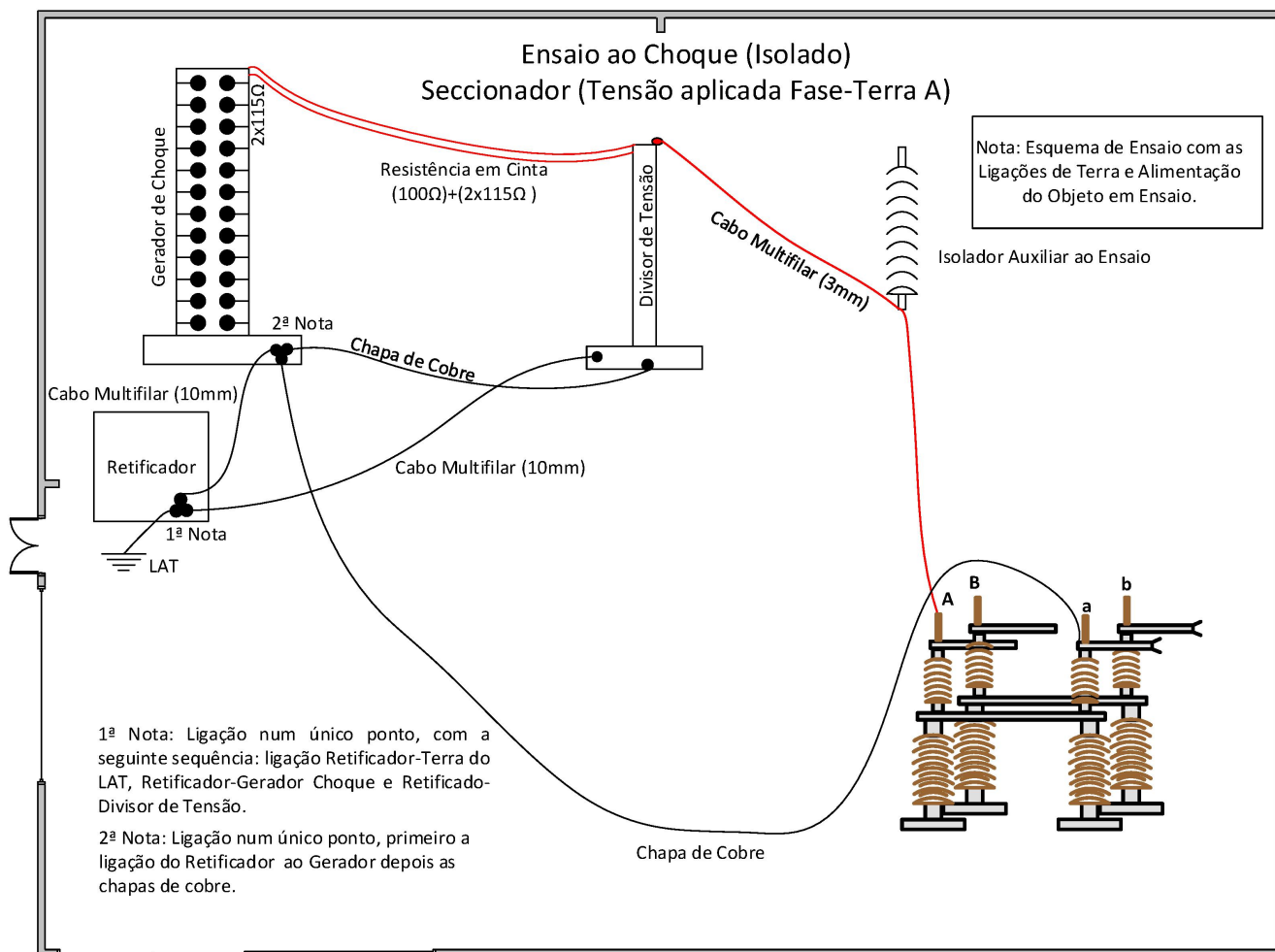


Figura 6.17: Esquema de ensaio ao choque numa ligação de seccionamento

A média dos valores obtidos durante o ensaio são os seguintes, tendo em atenção os diferentes pólos a serem alimentados e as respetivas polaridades.

Tabela 6.21: Média do tempo de frente, cauda e tensão em seccionamento (+) a

Seccionamento + (a)		
Tempo de Frente μs	Tempo de Cauda μs	Tensão Medida kV
1.34	47.37	192

De acordo com as correções atmosféricas todos os valores obtidos encontram-se dentro do intervalo. Os resultados obtidos foram 192 kV que, de acordo com as correções atmosféricas, correspondem a 193.7 kV. Trocando a polaridade do impulso.

Tabela 6.22: Média do tempo de frente, cauda e tensão em seccionamento (-) a

Seccionamento - (a)		
Tempo de Frente μs	Tempo de Cauda μs	Tensão Medida kV
1.3	47.55	-192

De acordo com as correções atmosféricas todos os valores obtidos encontram-se dentro do intervalo. Os resultados obtidos foram -192 kV que, de acordo com as correções atmosféricas, correspondem a -193.7 kV. De seguida foram feitos os mesmo ensaios para o pólo A.

Tabela 6.23: Média do tempo de frente, cauda e tensão em seccionamento (-) A

Seccionamento - (A)		
Tempo de Frente μs	Tempo de Cauda μs	Tensão Medida kV
1.3	47.55	-192

De acordo com as correções atmosféricas todos os valores obtidos encontram-se dentro do intervalo. Os resultados obtidos foram -192 kV que, de acordo com as correções atmosféricas, correspondem a -193.7 kV. Trocando a polaridade do impulso obtemos a seguinte tabela.

Tabela 6.24: Média do tempo de frente, cauda e tensão em seccionamento (+) A

Seccionamento + (A)		
Tempo de Frente μs	Tempo de Cauda μs	Tensão Medida kV
1.32	47.23	191.47

De acordo com as correções atmosféricas todos os valores obtidos encontram-se dentro do intervalo. Os resultados obtidos foram 190 kV e 192 kV que, de acordo com as correções atmosféricas, correspondem a 191.7 kV e 193.7 kV respetivamente. De seguida foram feitos os mesmo ensaios para o pólo B.

Tabela 6.25: Média do tempo de frente, cauda e tensão em seccionamento (+) B

Seccionamento + (B)		
Tempo de Frente μs	Tempo de Cauda μs	Tensão Medida kV
1.33	47.39	192

De acordo com as correções atmosféricas todos os valores obtidos encontram-se dentro do intervalo. Os resultados obtidos foram 192 kV que, de acordo com as correções atmosféricas, correspondem a 193.7 kV. Trocando a polaridade do impulso.

Tabela 6.26: Média do tempo de frente, cauda e tensão em seccionamento (-) B

Seccionamento - (B)		
Tempo de Frente μs	Tempo de Cauda μs	Tensão Medida kV
1.3	47.59	-192

De acordo com as correções atmosféricas todos os valores obtidos encontram-se dentro do intervalo. Os resultados obtidos foram -192 kV que, de acordo com as correções atmosféricas, correspondem a -193.7 kV. De seguida foram feitos os mesmo ensaios para o pólo b.

Tabela 6.27: Média do tempo de frente, cauda e tensão em seccionamento (-) b

Seccionamento - (b)		
Tempo de Frente μs	Tempo de Cauda μs	Tensão Medida kV
1.3	47.39	-192.1

De acordo com as correções atmosféricas todos os valores obtidos encontram-se dentro do intervalo. Os resultados obtidos foram -192 kV que, de acordo com as correções atmosféricas, correspondem a -193.7 kV. Trocando a polaridade do impulso obtemos a seguinte tabela.

Tabela 6.28: Média do tempo de frente, cauda e tensão em seccionamento (+) b

Seccionamento + (b)		
Tempo de Frente μs	Tempo de Cauda μs	Tensão Medida kV
1.33	47.33	191.6

De acordo com as correções atmosféricas todos os valores obtidos encontram-se dentro do intervalo. Os resultados obtidos foram 190 kV e 192 kV que, de acordo com as correções atmosféricas, correspondem a 191.7 kV e 193.7 kV respetivamente.

Nestes ensaios não foram detetados quaisquer contornamentos.

6.5 Ensaios à Frequência Industrial - Contornamento

Os seguintes ensaios foram feitos de modo a determinar a tensão à qual teria de ser o equipamento submetido à frequência industrial de modo a acontecer um contornamento. Como tal foram feitos 10 ensaios por cada situação. Os resultados podem ser consultados na íntegra em anexo.

6.5.1 Fase-Fase

No início do ensaios retiramos as condições atmosféricas para verificar a integridade dos resultados bem como para os poder corrigir para as condições climatéricas apropriadas.

Começamos por testar o par de pólos A-a. O valor médio de tensão na qual ocorreu o contornamento foi de 155.4 kV. Esta média foi encontrada após 10 ensaios com as seguintes condições atmosféricas.

Tabela 6.29: Condições atmosféricas pré ensaio à frequência industrial, numa ligação fase-fase

Condições Atmosféricas		Unidades
Temperatura	15.4	°C
Humidade Relativa	36	%
Pressão Atmosférica	1005	mbar

Seguidamente, ensaiamos o par de pólos B-b. O valor médio de tensão na qual ocorreu o contornamento foi de 154 kV. Esta média foi encontrada após 10 ensaios com as seguintes condições atmosféricas.

Tabela 6.30: Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, numa ligação fase-fase

Condições Atmosféricas		Unidades
Temperatura	15.6	°C
Humidade Relativa	36	%
Pressão Atmosférica	1005	mbar

Atendendo às condições atmosféricas, a média dos valores foram corrigidos para os seguintes valores.

Tabela 6.31: Valores de tensão média corrigidos

Valor Corrigido (kV)	
Tensão A-a	Tensão B-b
155.4	154.1

6.5.2 Fase-Terra

No início do ensaios retiramos as condições atmosféricas para verificar a integridade dos resultados, bem como para os poder corrigir os valores medidos para as condições climatéricas apropriadas.

O primeiro pólo a testar foi o pólo A. O valor médio de tensão na qual ocorreu o contornamento foi de 152.5 kV.

Esta média foi encontrada após 10 ensaios com as seguintes condições atmosféricas.

Tabela 6.32: Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, numa ligação fase-terra

Condições Atmosféricas		Unidades
Temperatura	15.9	°C
Humidade Relativa	36	%
Pressão Atmosférica	1005	mbar

Seguidamente, foi ensaiado o pólo a. O valor médio de tensão na qual ocorreu o contornamento foi de 158.8 kV. Esta média foi encontrada após 10 ensaios com as seguintes condições atmosféricas.

Tabela 6.33: Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, numa ligação fase-terra

Condições Atmosféricas		Unidades
Temperatura	16	°C
Humidade Relativa	36	%
Pressão Atmosférica	1005	mbar

Seguidamente, foi ensaiado o pólo B. O valor médio de tensão na qual ocorreu o contornamento foi de 153.3 kV. Esta média foi encontrada após 10 ensaios com as seguintes condições atmosféricas.

Tabela 6.34: Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, numa ligação fase-terra

Condições Atmosféricas		Unidades
Temperatura	16.1	°C
Humidade Relativa	36	%
Pressão Atmosférica	1005	mbar

Seguidamente, foi ensaiado o pólo b. O valor médio de tensão na qual ocorreu o contornamento foi de 156.5 kV. Esta média foi encontrada após 10 ensaios com as seguintes condições atmosféricas.

Tabela 6.35: Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, numa ligação fase-terra

Condições Atmosféricas		Unidades
Temperatura	16.1	°C
Humidade Relativa	36	%
Pressão Atmosférica	1005	mbar

Atendendo às condições atmosféricas, a média dos valores foram corrigidos para os seguintes valores.

Tabela 6.36: Valores de tensão média corrigidos

Valor Corrigido (kV)			
Tensão A	Tensão a	Tensão B	Tensão b
152.7	158.8	153.6	156.5

6.5.3 Seccionamento

No início dos ensaios são registadas as condições atmosféricas para verificar a integridade dos resultados bem como para os poder corrigir para as condições climatéricas apropriadas.

O primeiro pólo a ser ensaiado foi o pólo A. O valor médio de tensão na qual ocorreu o contornamento foi de 205 kV.

Esta média foi encontrada após 10 ensaios com as seguintes condições atmosféricas.

Tabela 6.37: Condições atmosféricas pré ensaio à frequência industrial, ligação de seccionamento A

Condições Atmosféricas		Unidades
Temperatura	16.2	°C
Humidade Relativa	36	%
Pressão Atmosférica	1005	mbar

Seguidamente, foi ensaiado o pólo a. O valor médio de tensão na qual ocorreu o contornamento foi de 210.5 kV. Esta média foi encontrada após 10 ensaios com as seguintes condições atmosféricas.

Tabela 6.38: Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, numa ligação de seccionamento

Condições Atmosféricas		Unidades
Temperatura	16.2	°C
Humidade Relativa	36	%
Pressão Atmosférica	1005	mbar

Seguidamente, foi ensaiado o pólo B. O valor médio de tensão na qual ocorreu o contornamento foi de 204.1 kV. Esta média foi encontrada após 10 ensaios com as seguintes condições atmosféricas.

Tabela 6.39: Condições atmosféricas pré ensaio à frequência industrial, ligação seccionamento ao pólo B

Condições Atmosféricas		Unidades
Temperatura	16.2	°C
Humidade Relativa	36	%
Pressão Atmosférica	1005	mbar

Seguidamente, foi ensaiado o pólo b. O valor médio de tensão na qual ocorreu o contornamento foi de 201.4 kV. Esta média foi encontrada após 10 ensaios com as seguintes condições atmosféricas.

Tabela 6.40: Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, ligação de seccionamento no pólo b

Condições Atmosféricas		Unidades
Temperatura	16.3	°C
Humidade Relativa	36	%
Pressão Atmosférica	1005	mbar

Atendendo às condições atmosféricas, a média dos valores foram corrigidos para os seguintes valores.

Tabela 6.41: Valores de tensão média corrigidos

Valor Corrigido (kV)			
Tensão A	Tensão a	Tensão B	Tensão b
205.5	210.9	204.1	201.9

6.6 Ensaios ao Choque - Contornamento

Neste ensaio recorre-se ao Método Up and Down, sendo o degrau utilizado na ordem dos 0.5 kV devido às limitações do equipamento, contudo para certos casos em que o intervalo demonstra regularmente não ser suficiente para causar um contornamento/evitar um contornamento, recorre-se a intervalos maiores. É importante ainda referir que um degrau é aplicado a cada andar do gerador, ou seja se temos um degrau de 0.5 kV e temos três andares em funcionamento do gerador, implica que cada adição ou subtração de um degrau, impacta um total de 1.5 kV (três vezes o valor do degrau). Recorremos em todos os casos a 20 ensaios.

O procedimento envolve determinar o intervalo mínimo de valores que separa o contornamento do não contornamento. Assim, após obtermos um contornamento, descemos a tensão para o valor anterior, caso não ocorra, aumentamos a tensão um degrau de cada vez até obter um contornamento.

6.6.1 Fase-Fase

No início do ensaio são registadas as condições atmosféricas. Os valores obtidos durante o ensaio seguirão em anexo. Neste ensaio foram utilizados 5 andares do gerador.

Tabela 6.42: Condições atmosféricas pré ensaio ao choque, numa ligação fase-fase ao par de pólos A-a

Condições Atmosféricas		Unidades
Temperatura	11	°C
Humidade Relativa	37	%
Pressão Atmosférica	1021	mbar
Tempo de Carregamento	45	Segundos

O seguinte gráfico ilustra os resultados do ensaio fase-fase do par de pólos A-a com polaridade positiva

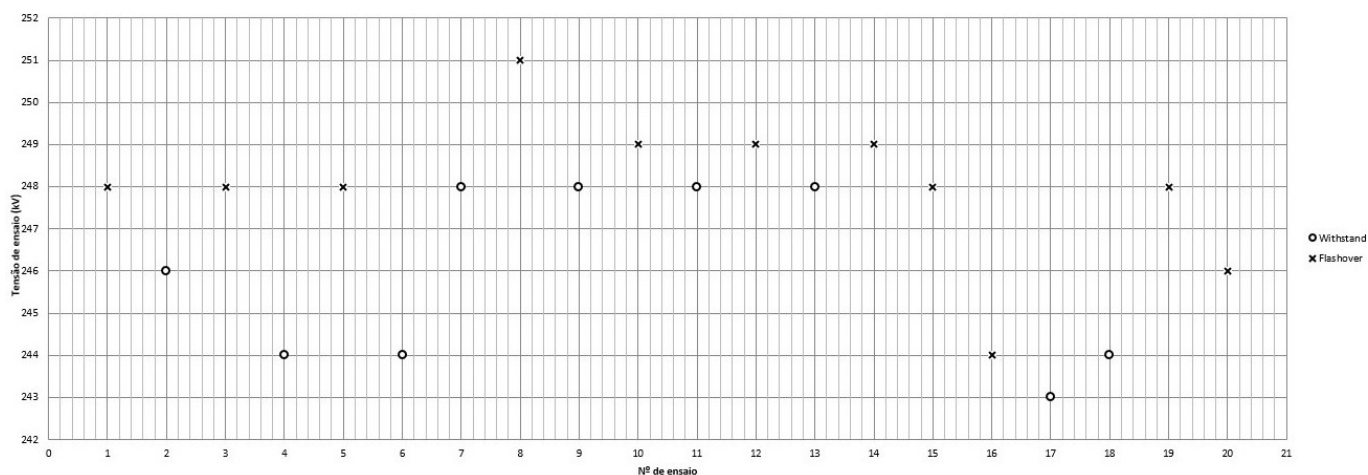


Figura 6.18: Resultados do ensaio (+) fase-fase do par A-a

Trocando a polaridade do impulso, como foram efectuados vinte ensaios, é necessário voltar a registar as condições atmosféricas.

Tabela 6.43: Condições atmosféricas pré ensaio ao choque, numa ligação fase-fase ao par de pólos A-a

Condições Atmosféricas		Unidades
Temperatura	12.4	°C
Humidade Relativa	36	%
Pressão Atmosférica	1019	mbar
Tempo de Carregamento	60	Segundos

O seguinte gráfico ilustra os resultados do ensaio fase-fase do par de pólos A-a com polaridade negativa.

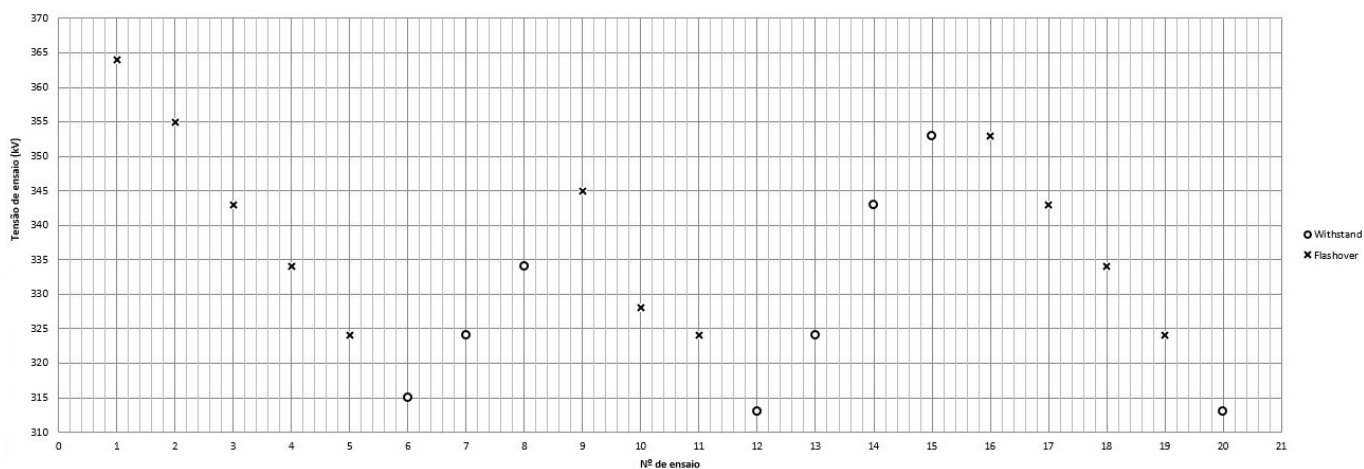


Figura 6.19: Representação gráfica dos resultados do ensaio fase-fase do par de pólos A-a com polaridade negativa

Neste caso em particular o degrau de 0.5 kV não era suficiente para notar mudanças significativas nos 20 ensaios. Assim, diminui-se um pouco a precisão, pela consistência dos resultados, utilizando 2 kV como degrau.

Tendo em conta os valores obtidos, foi calculado uma tensão média (de acordo com o método up and down) e o seu valor corrigido de acordo com as condições atmosféricas.

Tabela 6.44: Valores de tensão média corrigidos

Tensão A-a (+)	Tensão A-a (-)
Valor Médio (kV)	
247.056	332.2
Valor Corrigido (kV)	
256.9	345.5

6.6.2 Fase-Terra

No início do ensaio são registadas as condições atmosféricas. Os valores obtidos durante o ensaio seguirão em anexo. Neste ensaio foram utilizados 5 andares do gerador.

Tabela 6.45: Condições atmosféricas pré ensaio ao choque, numa ligação fase-terra ao pólo A

Condições Atmosféricas	Unidades	
Temperatura	12.1	°C
Humidade Relativa	35	%
Pressão Atmosférica	1019	mbar
Tempo de Carregamento	50	Segundos

O seguinte gráfico ilustra os resultados do ensaio fase-terra do pólo A com polaridade negativa.

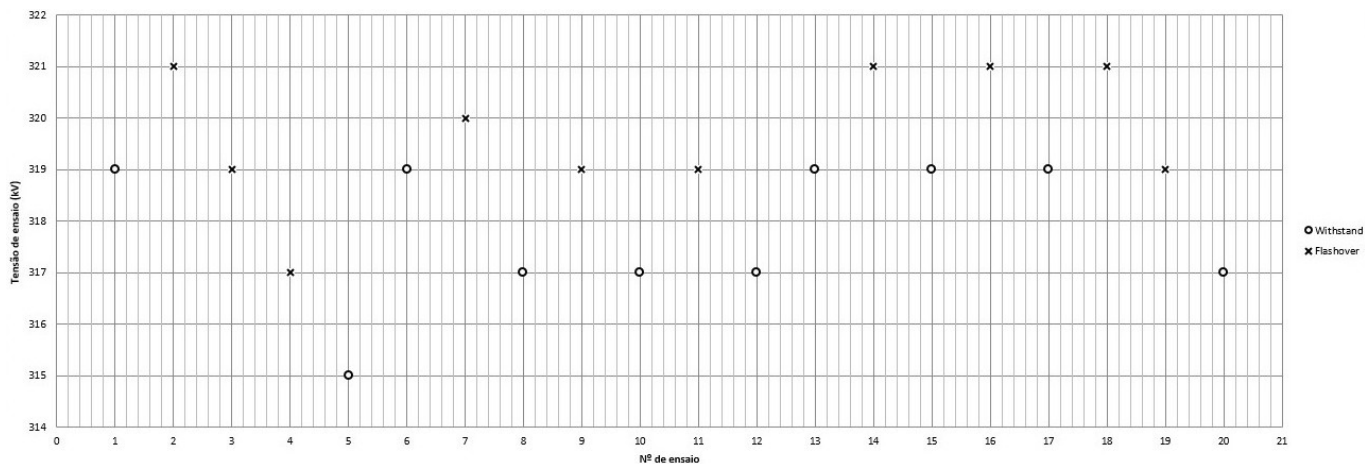


Figura 6.20: Representação gráfica dos resultados do ensaio fase-fase do par de pólos A-a com polaridade negativa

Trocando a polaridade do impulso, como foram efetuados vinte ensaios, é necessário voltar a registar as condições atmosféricas.

Tabela 6.46: Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, em condições de chuva numa ligação fase-fase

Condições Atmosféricas		Unidades
Temperatura	13.1	°C
Humidade Relativa	35	%
Pressão Atmosférica	1019	mbar
Tempo de Carregamento	50	Segundos

O seguinte gráfico ilustra os resultados do ensaio fase-terra do pólo A com polaridade positiva.

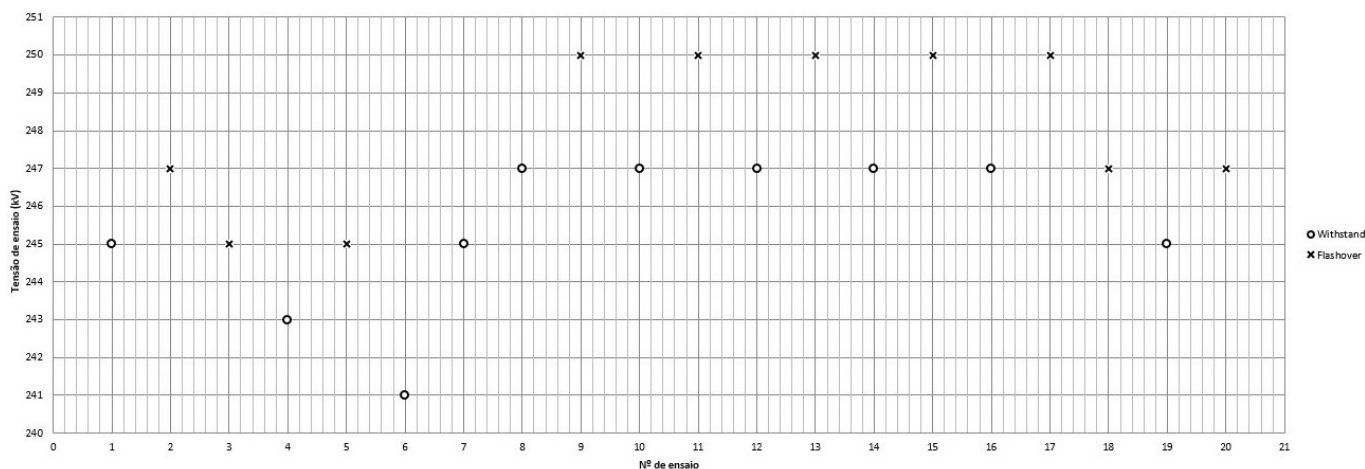


Figura 6.21: Resultados do ensaio (+) fase-terra do pólo A

Seguidamente, são repetidos os ensaios mas desta vez testando o pólo a, registando novamente as condições atmosféricas.

Tabela 6.47: Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, em condições de chuva numa ligação fase-fase

Condições Atmosféricas		Unidades
Temperatura	13.1	°C
Humidade Relativa	35	%
Pressão Atmosférica	1019	mbar
Tempo de Carregamento	50	Segundos

O seguinte gráfico ilustra os resultados do ensaio fase-terra do pólo a com polaridade positiva.

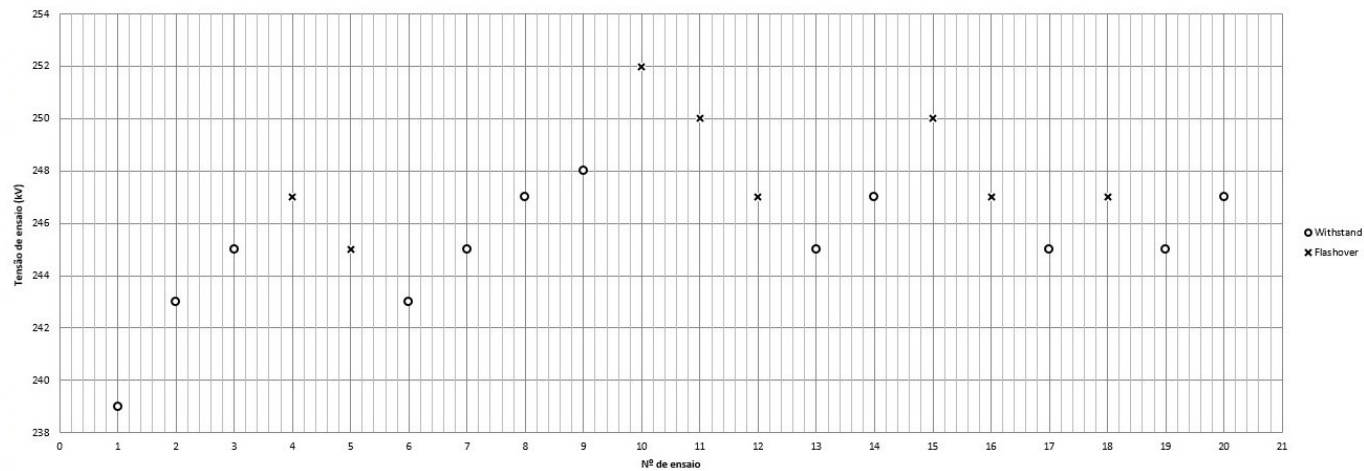


Figura 6.22: Resultados do ensaio (+) fase-terra do pólo a

Trocando a polaridade do impulso, como foram efetuados vinte ensaios, é necessário voltar a registar as condições atmosféricas.

Tabela 6.48: Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, em condições de chuva numa ligação fase-fase

Condições Atmosféricas		Unidades
Temperatura	12.5	°C
Humidade Relativa	40	%
Pressão Atmosférica	1020	mbar
Tempo de Carregamento	50	Segundos

O seguinte gráfico ilustra os resultados do ensaio fase-terra do pólo a com polaridade negativa.

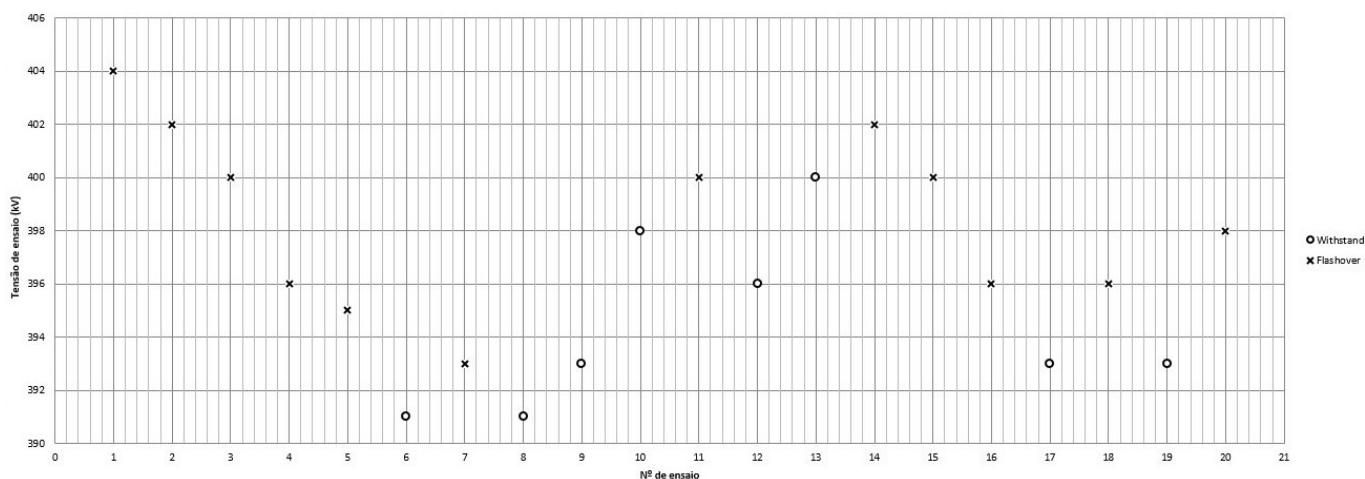


Figura 6.23: Resultados do ensaio (-) fase-terra do pólo a

Tendo em conta os valores obtidos, foi calculada a tensão média (de acordo com o método up and down) e o seu valor corrigido, de acordo com as condições atmosféricas.

Tabela 6.49: Valores de tensão média corrigidos

Tensão A (+)	Tensão A (-)	Tensão a (+)	Tensão a (-)
Valor Médio (kV)			
247.158	318.889	246.176	396.556
Valor Corrigido (kV)			
256.0	330.3	255.0	410.7

6.6.3 Seccionamento

No início do ensaio são registadas as condições atmosféricas. Os valores obtidos durante o ensaio seguirão em anexo. Neste ensaio foram utilizados 7 andares do gerador. O primeiro pólo ensaiado foi o pólo a com polaridade positiva.

Tabela 6.50: Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, em condições de chuva numa ligação fase-fase

Condições Atmosféricas		Unidades
Temperatura	14.1	°C
Humidade Relativa	36	%
Pressão Atmosférica	1019	mbar
Tempo de Carregamento	50	Segundos

O seguinte gráfico ilustra os resultados do ensaio ao seccionamento do pólo a com polaridade positiva.

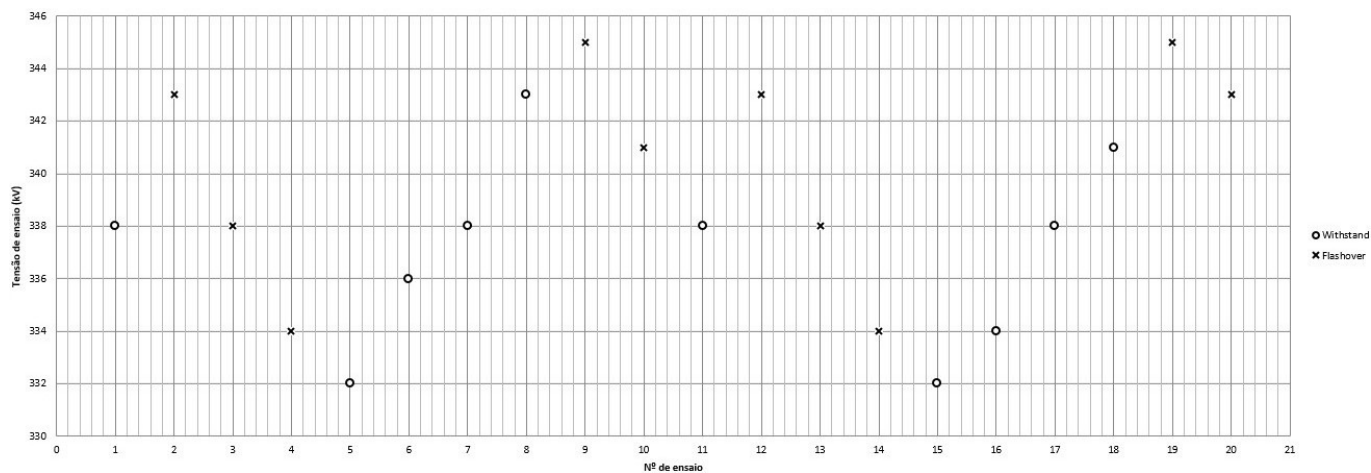


Figura 6.24: Resultados do ensaio ao seccionamento (+) do pólo a

Trocando a polaridade do impulso, como foram efectuados vinte ensaios, é necessário voltar a registar as condições atmosféricas.

Tabela 6.51: Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, em condições de chuva numa ligação fase-fase

Condições Atmosféricas		Unidades
Temperatura	13.9	°C
Humidade Relativa	37	%
Pressão Atmosférica	1019	mbar
Tempo de Carregamento	50	Segundos

O seguinte gráfico ilustra os resultados do ensaio ao seccionamento do pólo a com polaridade negativa.

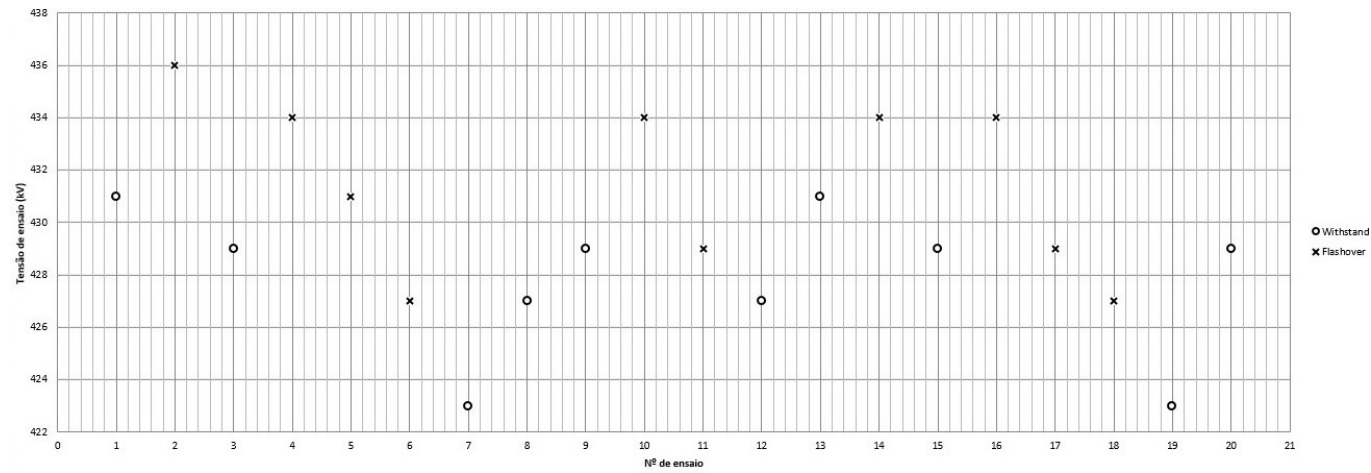


Figura 6.25: Resultados do ensaio ao seccionamento (-) do pólo a

Seguidamente, são repetidos os ensaios mas desta vez testando o pólo A, registando novamente as condições atmosféricas.

Tabela 6.52: Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, em condições de chuva numa ligação fase-fase

Condições Atmosféricas		Unidades
Temperatura	14	°C
Humidade Relativa	36	%
Pressão Atmosférica	1019	mbar
Tempo de Carregamento	50	Segundos

O seguinte gráfico ilustra os resultados do ensaio ao seccionamento do pólo A com polaridade negativa.

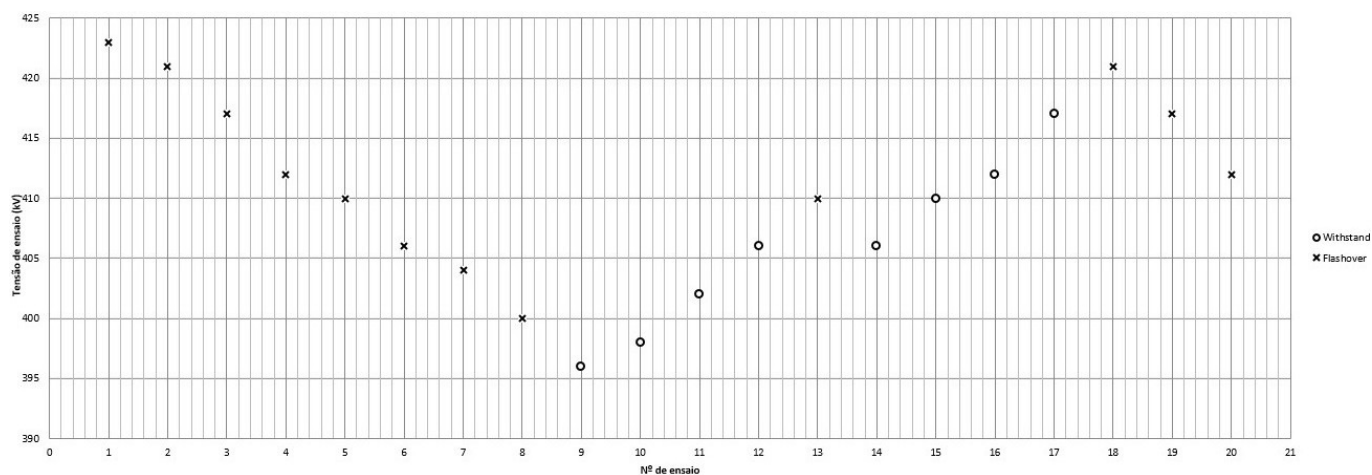


Figura 6.26: Resultados do ensaio ao seccionamento (-) do pólo A

Trocando a polaridade do impulso, como foram efetuados vinte ensaios, é necessário voltar a registar as condições atmosféricas.

Tabela 6.53: Condições atmosféricas para o ensaio à frequência industrial, em condições de chuva numa ligação fase-fase

Condições Atmosféricas		Unidades
Temperatura	14	°C
Humidade Relativa	36	%
Pressão Atmosférica	1019	mbar
Tempo de Carregamento	50	Segundos

O seguinte gráfico ilustra os resultados do ensaio ao seccionamento do pólo A com polaridade positiva.

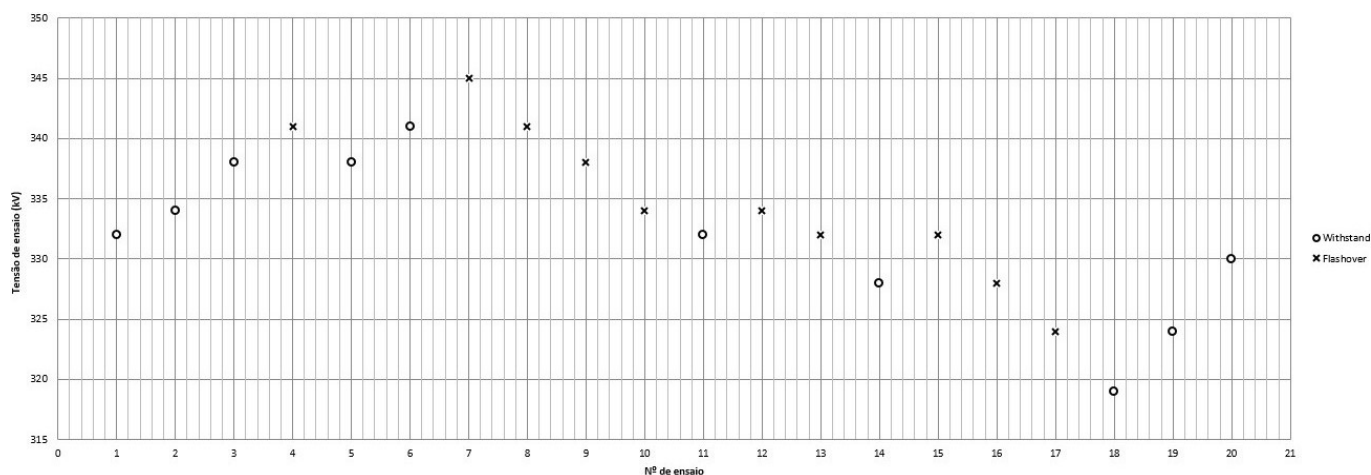


Figura 6.27: Resultados do ensaio ao seccionamento (+) do pólo A

Tendo em conta os valores obtidos, foi calculada a tensão média (de acordo com o método up and down) e o seu valor corrigido de acordo com as condições atmosféricas.

Tabela 6.54: Valores de tensão média corrigidos

Tensão A (+)	Tensão A (-)	Tensão a (+)	Tensão a (-)
Valor Médio (kV)			
333.588	412.643	338.8	429.316
Valor Corrigido (kV)			
324.8	401.8	329.9	418.0

6.7 Conclusão

O seccionador passou com sucesso a todos os ensaios standard que estão descritos na norma [47], respeitando todas as margens de funcionamento exigidas pela mesma. Foram feitos ensaios de contornamento com o intuito de verificar qual seria a tensão de suportabilidade do respetivo equipamento que permitiram determinar que este seccionador encontra-se sobredimensionado, capaz de tolerar valores bastante superiores ao descrito na chapa de características (36 kV), bem como valores superiores aos definidos pela norma [47]. Esta é uma característica desejada no equipamento, tendo as empresas manufadoras de equipamento elétrico procurado sempre dar uma boa margem de segurança em caso de que seja necessário aumentar um pouco o valor da tensão por questões de funcionamento da rede.

O meu parecer é que este equipamento encontra-se em perfeitas condições de funcionamento e dimensionamento. Este parecer tem por base o comportamento deste equipamento quando submetido aos ensaios descritos neste capítulo.

Capítulo 7

Considerações Finais

7.1 Conclusões Finais

Uma das maiores incertezas durante o processo da presente dissertação foi a capacidade de executar os ensaios à chuva com o sistema de simulação no LAT e o nível de sucesso desses mesmos ensaios. Acontece que o sistema de simulação de chuva, após um período inicial de habituação ao funcionamento do equipamento, funcionou em perfeitas condições, havendo ainda uma ligeira dificuldade na calibração do mesmo, sendo preciso algum tempo para o calibrar.

A utilização do sistema de chuva no ensaio dos seccionadores já potenciou, no decorrer da dissertação, para a utilização do sistema de simulação de chuva noutros equipamentos, nomeadamente num equipamento OCR da EFACEC e em isoladores cerâmicos da CERISOL. O tempo de calibração diminuiu ao longo dos ensaios com o ganho de familiaridade de manuseamento do equipamento. No presente relatório foi necessária sensivelmente uma semana para o calibrar, desde então os ensaios que já foram desenvolvidos necessitaram de apenas uma tarde para conseguir ter o equipamento a trabalhar dentro dos valores normativos.

A parceria do LAT-FEUP com a EFACEC foi fortalecida com o trabalho desenvolvido, tendo sido desde então (e como anteriormente mencionado) renovada a colaboração entre estas duas entidades com o ensaio de novos equipamentos. Também foi possível determinar que o LAT possui as valências necessárias para ensaios à frequência industrial (a seco e à chuva) e ensaios ao choque, estando o equipamento calibrado nunca ultrapassando o erro de $\pm 3\%$. Esta capacidade deve-se a uma excelente e regular manutenção dos equipamentos presentes no mesmo.

7.2 Satisfação dos Objetivos

Os objetivos principais desta dissertação correspondem à análise do comportamento de seccionadores, confirmando as suas funcionalidades, recorrendo ao LAT. De forma a obter uma análise rigorosa foi necessário fazer um reconhecimento inicial aos equipamentos presentes no LAT, nomeadamente o seu funcionamento, capacidades e potenciais pontos de avaria. Com este estudo foi

possível chegar às bases teóricas indispensáveis para a compreensão e bom desenvolvimento dos ensaios a realizar.

Como qualquer máquina, também os seccionadores são sujeitos a uma série de ensaios de rotina antes de serem comercializados, de forma a perceber se o seu desempenho se encontra apto para condições reais. Tendo em consideração os equipamentos existentes no LAT mostrou-se possível efetuar dois tipos de ensaios: ensaio à frequência industrial, isto é, ensaio à rigidez dielétrica; e ensaio ao impulso atmosférico. Durante os ensaios não se verificou qualquer inconformidade, sendo que os equipamentos suportaram o valor estipulado respetivo durante o período estabelecido.

7.3 Trabalhos Futuros

Um trabalho de *follow-up* com grande relevância seria o desenvolvimento de um protocolo de ensaio geral, que poderia ser adaptado a ensaios específicos, de maneira a sistematizar os ensaios, tornando mais fáceis e rápidos os ensaios a diferentes equipamentos. Outro trabalho futuro passaria pelo desenvolvimento de um programa que fizesse os ensaios de acordo com os resultados em tempo real, ou seja, um programa que lesse os resultados e repetisse o ensaio de acordo com os resultados, que fornecesse as imagens do monitor do dias como um ficheiro tornando possível a sua utilização em relatório.

Seria interessante o desenvolvimento de um estudo mais cuidado na área da calibração dos equipamentos de medição, nomeadamente um estudo que análise, por exemplo, o efeito das perdas nos cabos de sinal.

Anexo A

Resultados dos Ensaio à Frequência Industrial a Seco

Ensaio à Frequência Industrial (50 Hz)					
Fase-Fase Seco					
Pólo(s)	Tensão	Resultado	Condições atmosféricas		Unidades
A-a	70kV	OK	Temperatura	17,3	°C
			Humidade Relativa	45	%
			Pressão Atmosférica	1007	mbar
B-b	70kV	OK			
Fase-Terra Seco					
Pólo(s)	Tensão	Resultado	Condições atmosféricas		Unidades
A	70kV	OK	Temperatura	17,3	°C
		OK	Humidade Relativa	45	%
	80kV	OK	Pressão Atmosférica	1007	mbar
		OK			
a	70kV	OK			
		OK			
	80kV	OK			
		OK			
B	70kV	OK			
		OK			
	80kV	OK			
		OK			
b	70kV	OK			
		OK			
	80kV	OK			
		OK			

Isolado Seco					
Pólo(s)	Tensão	Resultado	Condições atmosféricas		Unidades
A-a	80kV	OK	Temperatura	19,7	°C
		OK	Humidade Relativa	48	%
B-b	80kV	OK	Pressão Atmosférica	1014	mbar
		OK			

Anexo B

Resultados dos Ensaaios à Frequência Industrial à Chuva

Ensaaios à Frequência Industrial (50 Hz)					
Fase-Fase Chuva					
Pólo(s)	Tensão	Resultado	Condições atmosféricas		Unidades
A-a	70kV	OK		18,9	°C
			Humidade Relativa	45	%
			Pressão Atmosférica	1007	mbar
			Componente Vertical	1,5	mm/min
B-b	70kV	OK	Componente Horizontal	1,8	mm/min
			Pressão da água	1,9	b
Fase-Terra Chuva					
Pólo(s)	Tensão	Resultado	Condições atmosféricas		Unidades
A	70kV	OK	Temperatura	18,9	°C
		OK	Humidade Relativa	45	%
	80kV	OK	Pressão Atmosférica	1007	mbar
		OK	Componente Vertical	1,5	mm/min
a	70kV	OK	Componente Horizontal	1,8	mm/min
		OK	Pressão da água	1,9	b
	80kV	OK			
		OK			
B	70kV	OK			
		OK			
	80kV	OK			
		OK			
b	70kV	OK			
		OK			
	80kV	OK			
		OK			

Isolado Chuva					
Pólo(s)	Tensão	Resultado	Condições atmosféricas		Unidades
A	80kV	OK	Temp,	19,7	°C
		OK	Humidade Relativa	48	%
a	80kV	OK	Pressão Atmosférica	1014	mbar
		OK	Componente Vertical	1,4	mm/min
B	80kV	OK	Componente Horizontal	1,7	mm/min
		OK	Pressão da água	1,8	b
b	80kV	OK			
		OK			

Anexo C

Resultados dos Ensaio ao Choque

Fase Fase + (A-a)							
Valores Normativos	1,2 μs		50 μs		170 kV		Flashover
	0,84 μs	1,56 μs	40 μs	60 μs	164,9 kV	175,1 kV	
Ensaio 1	1,32		46,9		166		NO
Ensaio 2	1,33		47		166		NO
Ensaio 3	1,33		46,9		166		NO
Ensaio 4	1,34		46,8		166		NO
Ensaio 5	1,29		46,2		164		NO
Ensaio 6	1,34		46,9		166		NO
Ensaio 7	1,34		46,8		166		NO
Ensaio 8	1,34		46,8		166		NO
Ensaio 9	1,31		46,7		166		NO
Ensaio 10	1,29		46,2		164		NO
Ensaio 11	1,32		46,9		166		NO
Ensaio 12	1,33		46,9		166		NO
Ensaio 13	1,33		46,9		166		NO
Ensaio 14	1,27		46,2		164		NO
Ensaio 15	1,34		47,1		166		NO

Fase Fase - (A-a)							
Valores Normativos	1,2 μs		50 μs		-170 kV		Flashover
	0,84 μs	1,56 μs	40 μs	60 μs	-164,9 kV	-175,1 kV	
Ensaio 1	1,27		47,3		-166		NO
Ensaio 2	1,32		47,4		-166		NO
Ensaio 3	1,3		47,4		-166		NO
Ensaio 4	1,29		47,4		-166		NO
Ensaio 5	1,3		47,4		-166		NO
Ensaio 6	1,3		47,3		-166		NO
Ensaio 7	1,27		47,4		-166		NO
Ensaio 8	1,3		47,3		-166		NO
Ensaio 9	1,32		47,2		-166		NO
Ensaio 10	1,29		47,3		-166		NO
Ensaio 11	1,27		47,3		-166		NO
Ensaio 12	1,29		47,4		-166		NO
Ensaio 13	1,3		47,4		-166		NO
Ensaio 14	1,3		47,4		-166		NO
Ensaio 15	1,27		47,5		-166		NO

Fase Fase - (B-b)							
Valores Normativos	1,2 μs		50 μs		-170 kV		Flashover
	0,84 μs	1,56 μs	40 μs	60 μs	-164,9 kV	-175,1 kV	
Ensaio 1	1,29		47,2		-166		NO
Ensaio 2	1,3		47,3		-166		NO
Ensaio 3	1,3		47,3		-166		NO
Ensaio 4	1,3		47,3		-166		NO
Ensaio 5	1,29		47,4		-166		NO
Ensaio 6	1,33		47,5		-166		NO
Ensaio 7	1,3		47,4		-166		NO
Ensaio 8	1,29		47,4		-166		NO
Ensaio 9	1,29		47,3		-166		NO
Ensaio 10	1,31		47,4		-166		NO
Ensaio 11	1,31		47,4		-166		NO
Ensaio 12	1,27		47,4		-166		NO
Ensaio 13	1,3		47,5		-166		NO
Ensaio 14	1,3		47,4		-166		NO
Ensaio 15	1,27		47,6		-166		NO

Fase Fase + (B-b)							
Valores Normativos	1,2 μs		50 μs		170 kV		Flashover
	0,84 μs	1,56 μs	40 μs	60 μs	164,9 kV	175,1 kV	
Ensaio 1	1,34		46,9		166		NO
Ensaio 2	1,32		46,9		166		NO
Ensaio 3	1,33		46,9		166		NO
Ensaio 4	1,27		46,2		164		NO
Ensaio 5	1,32		46		164		NO
Ensaio 6	1,33		47		166		NO
Ensaio 7	1,29		46,1		164		NO
Ensaio 8	1,34		46,8		166		NO
Ensaio 9	1,34		46,9		166		NO
Ensaio 10	1,3		46,2		164		NO
Ensaio 11	1,29		46,4		164		NO
Ensaio 12	1,3		46,3		164		NO
Ensaio 13	1,29		46,1		164		NO
Ensaio 14	1,34		46,8		166		NO
Ensaio 15	1,32		47,2		166		NO

Fase Terra + (b)							
Valores Normativos	1,2 μs		50 μs		170 kV		Flashover
	0,84 μs	1,56 μs	40 μs	60 μs	164,9 kV	175,1 kV	
Ensaio 1	1,3		46,3		164		NO
Ensaio 2	1,31		46,2		164		NO
Ensaio 3	1,34		46,9		166		NO
Ensaio 4	1,32		46,9		166		NO
Ensaio 5	1,33		46,9		166		NO
Ensaio 6	1,33		46,9		166		NO
Ensaio 7	1,35		46,9		166		NO
Ensaio 8	1,35		46,9		166		NO
Ensaio 9	1,33		46,9		166		NO
Ensaio 10	1,3		46,1		164		NO
Ensaio 11	1,34		47		166		NO
Ensaio 12	1,33		46,9		166		NO
Ensaio 13	1,34		47		166		NO
Ensaio 14	1,33		46,3		164		NO
Ensaio 15	1,33		47,1		166		NO

Fase Terra - (b)							
Valores Normativos	1,2 μ s		50 μ s		-170 kV		Flashover
	0,84 μ s	1,56 μ s	40 μ s	60 μ s	-164,9 kV	-175,1 kV	
Ensaio 1	1,32		47,2		-166		NO
Ensaio 2	1,3		47,3		-166		NO
Ensaio 3	1,29		47,2		-166		NO
Ensaio 4	1,32		47,2		-166		NO
Ensaio 5	1,3		47,2		-166		NO
Ensaio 6	1,29		47,3		-166		NO
Ensaio 7	1,3		47,1		-166		NO
Ensaio 8	1,29		47,2		-166		NO
Ensaio 9	1,3		47,2		-166		NO
Ensaio 10	1,27		47,2		-166		NO
Ensaio 11	1,31		47,3		-166		NO
Ensaio 12	1,31		47,2		-166		NO
Ensaio 13	1,3		47,3		-166		NO
Ensaio 14	1,29		47,3		-166		NO
Ensaio 15	1,29		47,4		-166		NO

Fase Terra - (B)							
Valores Normativos	1,2 μ s		50 μ s		-170 kV		Flashover
	0,84 μ s	1,56 μ s	40 μ s	60 μ s	-164,9 kV	-175,1 kV	
Ensaio 1	1,31		47,3		-166		NO
Ensaio 2	1,31		47,2		-166		NO
Ensaio 3	1,3		47,3		-166		NO
Ensaio 4	1,31		47,3		-166		NO
Ensaio 5	1,31		47,2		-166		NO
Ensaio 6	1,31		47,3		-166		NO
Ensaio 7	1,31		47,2		-166		NO
Ensaio 8	1,31		47,2		-166		NO
Ensaio 9	1,29		47,3		-166		NO
Ensaio 10	1,27		47,3		-166		NO
Ensaio 11	1,29		47,3		-166		NO
Ensaio 12	1,32		47,3		-166		NO
Ensaio 13	1,27		47,3		-166		NO
Ensaio 14	1,3		47,2		-166		NO
Ensaio 15	1,3		47,4		-166		NO

Fase Terra + (B)							
Valores Normativos	1,2 μ s		50 μ s		170 kV		Flashover
	0,84 μ s	1,56 μ s	40 μ s	60 μ s	164,9 kV	175,1 kV	
Ensaio 1	1,33		47,1		166		NO
Ensaio 2	1,31		47		166		NO
Ensaio 3	1,29		46,4		164		NO
Ensaio 4	1,3		46,5		164		NO
Ensaio 5	1,32		47		166		NO
Ensaio 6	1,34		47,1		166		NO
Ensaio 7	1,3		46,3		164		NO
Ensaio 8	1,35		46,8		166		NO
Ensaio 9	1,35		46,9		166		NO
Ensaio 10	1,29		46,3		164		NO
Ensaio 11	1,31		46,3		164		NO
Ensaio 12	1,3		46,3		164		NO
Ensaio 13	1,3		46,3		164		NO
Ensaio 14	1,33		46,9		166		NO
Ensaio 15	1,33		47,1		166		NO

Fase Terra + (A)							
Valores Normativos	1,2 μ s		50 μ s		170 kV		Flashover
	0,84 μ s	1,56 μ s	40 μ s	60 μ s	164,9 kV	175,1 kV	
Ensaio 1	1,31		46,1		164		NO
Ensaio 2	1,3		46,3		164		NO
Ensaio 3	1,33		46,9		166		NO
Ensaio 4	1,33		46,2		164		NO
Ensaio 5	1,33		46,9		166		NO
Ensaio 6	1,31		46,4		164		NO
Ensaio 7	1,31		46,1		164		NO
Ensaio 8	1,31		46,2		164		NO
Ensaio 9	1,3		46,4		164		NO
Ensaio 10	1,32		47		166		NO
Ensaio 11	1,3		46,3		164		NO
Ensaio 12	1,3		46,4		164		NO
Ensaio 13	1,31		46,3		164		NO
Ensaio 14	1,3		46,2		164		NO
Ensaio 15	1,33		47,1		166		NO

Fase Terra - (A)							
Valores Normativos	1,2 μs		50 μs		-170 kV		Flashover
	0,84 μs	1,56 μs	40 μs	60 μs	-164,9 kV	-175,1 kV	
Ensaio 1	1,3		47,3		-166		NO
Ensaio 2	1,32		47,4		-166		NO
Ensaio 3	1,27		47,3		-166		NO
Ensaio 4	1,27		47,2		-166		NO
Ensaio 5	1,27		46,4		-164		NO
Ensaio 6	1,3		47,3		-166		NO
Ensaio 7	1,29		47,3		-166		NO
Ensaio 8	1,32		47,2		-166		NO
Ensaio 9	1,31		47,3		-166		NO
Ensaio 10	1,3		47,2		-166		NO
Ensaio 11	1,31		47,3		-166		NO
Ensaio 12	1,29		47,2		-166		NO
Ensaio 13	1,32		47,2		-166		NO
Ensaio 14	1,32		47,3		-166		NO
Ensaio 15	1,3		47,4		-166		NO

Fase Terra - (a)							
Valores Normativos	1,2 μs		50 μs		-170 kV		Flashover
	0,84 μs	1,56 μs	40 μs	60 μs	-164,9 kV	-175,1 kV	
Ensaio 1	1,29		47,2		-166		NO
Ensaio 2	1,29		47,2		-166		NO
Ensaio 3	1,31		47,3		-166		NO
Ensaio 4	1,3		47,3		-166		NO
Ensaio 5	1,29		47,3		-166		NO
Ensaio 6	1,29		47,2		-166		NO
Ensaio 7	1,3		47,2		-166		NO
Ensaio 8	1,3		47,2		-166		NO
Ensaio 9	1,32		47,3		-166		NO
Ensaio 10	1,31		47,3		-166		NO
Ensaio 11	1,29		47,3		-166		NO
Ensaio 12	1,27		46,5		-164		NO
Ensaio 13	1,3		47,3		-166		NO
Ensaio 14	1,31		47,2		-166		NO
Ensaio 15	1,31		47,5		-166		NO

Fase Terra + (a)							
Valores Normativos	1,2 μ s		50 μ s		170 kV		Flashover
	0,84 μ s	1,56 μ s	40 μ s	60 μ s	164,9 kV	175,1 kV	
Ensaio 1	1,33		46,3		164		NO
Ensaio 2	1,31		46,3		164		NO
Ensaio 3	1,27		46,2		164		NO
Ensaio 4	1,3		46,5		164		NO
Ensaio 5	1,31		46,4		164		NO
Ensaio 6	1,33		46,4		164		NO
Ensaio 7	1,3		46,5		164		NO
Ensaio 8	1,31		46,5		164		NO
Ensaio 9	1,31		46,3		164		NO
Ensaio 10	1,33		46,2		164		NO
Ensaio 11	1,31		46,4		164		NO
Ensaio 12	1,3		46,5		164		NO
Ensaio 13	1,33		46,4		164		NO
Ensaio 14	1,31		46,2		164		NO
Ensaio 15	1,34		47,1		166		NO

Isolado + (a)							
Valores Normativos	1,2 μ s		50 μ s		195 kV		Flashover
	0,84 μ s	1,56 μ s	40 μ s	60 μ s	189,15 kV	200,85 kV	
Ensaio 1	1,34		47,4		192		NO
Ensaio 2	1,35		47,4		192		NO
Ensaio 3	1,32		47,4		192		NO
Ensaio 4	1,33		47,4		192		NO
Ensaio 5	1,32		47,4		192		NO
Ensaio 6	1,33		47,4		192		NO
Ensaio 7	1,32		47,3		192		NO
Ensaio 8	1,34		47,3		192		NO
Ensaio 9	1,36		47,3		192		NO
Ensaio 10	1,34		47,4		192		NO
Ensaio 11	1,33		47,3		192		NO
Ensaio 12	1,34		47,3		192		NO
Ensaio 13	1,36		47,4		192		NO
Ensaio 14	1,34		47,3		192		NO
Ensaio 15	1,34		47,5		192		NO

Isolado - (a)							
Valores Normativos	1,2 μs		50 μs		-195 kV		Flashover
	0,84 μs	1,56 μs	40 μs	60 μs	-189,15 kV	-200,85 kV	
Ensaio 1	1,3		47,6		-192		NO
Ensaio 2	1,32		47,6		-192		NO
Ensaio 3	1,32		47,5		-192		NO
Ensaio 4	1,32		47,6		-192		NO
Ensaio 5	1,31		47,6		-192		NO
Ensaio 6	1,29		47,5		-192		NO
Ensaio 7	1,32		47,6		-192		NO
Ensaio 8	1,3		47,5		-192		NO
Ensaio 9	1,3		47,5		-192		NO
Ensaio 10	1,3		47,5		-192		NO
Ensaio 11	1,3		47,5		-192		NO
Ensaio 12	1,29		47,6		-192		NO
Ensaio 13	1,3		47,4		-192		NO
Ensaio 14	1,3		47,5		-192		NO
Ensaio 15	1,3		47,7		-192		NO

Isolado - (A)							
Valores Normativos	1,2 μs		50 μs		-195 kV		Flashover
	0,84 μs	1,56 μs	40 μs	60 μs	-189,15 kV	-200,85 kV	
Ensaio 1	1,3		47,4		-192		NO
Ensaio 2	1,27		47,5		-192		NO
Ensaio 3	1,3		47,4		-192		NO
Ensaio 4	1,29		47,5		-192		NO
Ensaio 5	1,32		47,6		-192		NO
Ensaio 6	1,31		47,6		-192		NO
Ensaio 7	1,29		47,6		-192		NO
Ensaio 8	1,3		47,5		-192		NO
Ensaio 9	1,32		47,6		-192		NO
Ensaio 10	1,3		47,6		-192		NO
Ensaio 11	1,32		47,6		-192		NO
Ensaio 12	1,3		47,5		-192		NO
Ensaio 13	1,31		47,6		-192		NO
Ensaio 14	1,3		47,5		-192		NO
Ensaio 15	1,3		47,7		-192		NO

Isolado + (A)							
Valores Normativos	1,2 μ s		50 μ s		195 kV		Flashover
	0,84 μ s	1,56 μ s	40 μ s	60 μ s	189,15 kV	200,85 kV	
Ensaio 1	1,31		47,4		192		NO
Ensaio 2	1,33		47,4		192		NO
Ensaio 3	1,36		47,4		192		NO
Ensaio 4	1,32		47,5		192		NO
Ensaio 5	1,32		47,4		192		NO
Ensaio 6	1,35		47,4		192		NO
Ensaio 7	1,34		47,4		192		NO
Ensaio 8	1,33		47,4		192		NO
Ensaio 9	1,29		46,7		190		NO
Ensaio 10	1,32		47,4		192		NO
Ensaio 11	1,31		46,8		190		NO
Ensaio 12	1,29		46,7		190		NO
Ensaio 13	1,31		46,8		190		NO
Ensaio 14	1,36		47,4		192		NO
Ensaio 15	1,32		47,4		192		NO

Isolado + (B)							
Valores Normativos	1,2 μ s		50 μ s		195 kV		Flashover
	0,84 μ s	1,56 μ s	40 μ s	60 μ s	189,15 kV	200,85 kV	
Ensaio 1	1,33		47,4		192		NO
Ensaio 2	1,32		47,3		192		NO
Ensaio 3	1,33		47,4		192		NO
Ensaio 4	1,33		47,3		192		NO
Ensaio 5	1,32		47,4		192		NO
Ensaio 6	1,34		47,4		192		NO
Ensaio 7	1,32		47,4		192		NO
Ensaio 8	1,33		47,4		192		NO
Ensaio 9	1,33		47,4		192		NO
Ensaio 10	1,34		47,5		192		NO
Ensaio 11	1,34		47,5		192		NO
Ensaio 12	1,34		47,4		192		NO
Ensaio 13	1,35		47,3		192		NO
Ensaio 14	1,33		47,3		192		NO
Ensaio 15	1,34		47,5		192		NO

Isolado - (B)							
Valores Normativos	1,2 μ s		50 μ s		-195 kV		Flashover
	0,84 μ s	1,56 μ s	40 μ s	60 μ s	-189,15 kV	-200,85 kV	
Ensaio 1	1,3		47,6		-192		NO
Ensaio 2	1,3		47,7		-192		NO
Ensaio 3	1,31		47,6		-192		NO
Ensaio 4	1,29		47,6		-192		NO
Ensaio 5	1,32		47,6		-192		NO
Ensaio 6	1,3		47,5		-192		NO
Ensaio 7	1,3		47,6		-192		NO
Ensaio 8	1,3		47,6		-192		NO
Ensaio 9	1,3		47,6		-192		NO
Ensaio 10	1,3		47,5		-192		NO
Ensaio 11	1,31		47,5		-192		NO
Ensaio 12	1,3		47,5		-192		NO
Ensaio 13	1,3		47,5		-192		NO
Ensaio 14	1,3		47,6		-192		NO
Ensaio 15	1,3		47,8		-192		NO

Isolado - (b)							
Valores Normativos	1,2 μ s		50 μ s		-195 kV		Flashover
	0,84 μ s	1,56 μ s	40 μ s	60 μ s	-189,15 kV	-200,85 kV	
Ensaio 1	1,3		47,5		-192		NO
Ensaio 2	1,3		47,4		-192		NO
Ensaio 3	1,3		47,5		-192		NO
Ensaio 4	1,31		47,5		-192		NO
Ensaio 5	1,31		47,6		-192		NO
Ensaio 6	1,3		47,4		-192		NO
Ensaio 7	1,3		47,5		-192		NO
Ensaio 8	1,29		47,5		-192		NO
Ensaio 9	1,32		47,5		-192		NO
Ensaio 10	1,3		47,6		-192		NO
Ensaio 11	1,27		47,5		-192		NO
Ensaio 12	1,3		47,5		-192		NO
Ensaio 13	1,31		47,5		-192		NO
Ensaio 14	1,3		47,5		-192		NO
Ensaio 15	1,3		45,9		-193		NO

Isolado + (b)							
Valores Normativos	1,2 μ s		50 μ s		195 kV		Flashover
	0,84 μ s	1,56 μ s	40 μ s	60 μ s	189,15 kV	200,85 kV	
Ensaio 1	1,33		47,4		192		NO
Ensaio 2	1,33		47,4		192		NO
Ensaio 3	1,34		47,5		192		NO
Ensaio 4	1,34		47,4		192		NO
Ensaio 5	1,34		47,4		192		NO
Ensaio 6	1,32		47,4		192		NO
Ensaio 7	1,3		46,8		190		NO
Ensaio 8	1,32		47,4		192		NO
Ensaio 9	1,38		47,4		192		NO
Ensaio 10	1,32		46,9		190		NO
Ensaio 11	1,33		47,5		192		NO
Ensaio 12	1,3		46,9		190		NO
Ensaio 13	1,36		47,5		192		NO
Ensaio 14	1,33		47,4		192		NO
Ensaio 15	1,34		47,6		192		NO

Anexo D

Resultados dos Ensaio à Frequência Industrial - Contornamento

Nº Ensaio	Fase-Fase		Fase-Terra				Isolado			
	Aa	Bb	A	a	B	b	A	a	B	b
1	154	155	149	155	153	157	200	208	202	195
2	156	155	153	155	155	160	206	203	205	195
3	156	152	155	162	153	154	205	209	207	208
4	156	150	154	160	150	155	201	215	205	205
5	156	155	149	165	155	152	207	215	201	208
6	157	155	150	155	155	160	208	206	205	205
7	155	155	150	165	155	162	205	212	203	200
8	153	154	155	153	155	155	210	207	205	200
9	157	154	155	160	150	155	203	215	201	198
10	154	155	155	155	152	155	205	215	203	200
Média	155.4	154	152.5	158.5	153.3	156.5	205	210.5	203.7	201.4

Anexo E

Resultados dos Ensaio ao Choque - Contornamento

Lightning impluse flashover voltage test (U50) - Closed Aa						
Polaridade positiva						
x = contornamento				o = não contornamento		
20 ensaios	Tensão por andar (5 andares)	Tf	T2/Tc	Contornamento	kV	
1	49	1.14	9.7	x	248	
2	48.5	1.13	46.5	o	246	
3	49	1.12	8.1	x	248	
4	48.5	1.11	47.8	o	244	
5	49	1.13	9.2	x	248	
6	48.5	1.13	47.7	o	244	
7	49	1.15	47.6	o	248	
8	49.5	1.15	13.7	x	251	
9	49	1.13	47.5	o	248	
10	49.5	1.14	8.3	x	249	
11	49	1.14	47.6	o	248	
12	49.5	1.13	8.3	x	249	
13	49	1.14	47.7	o	248	
14	49.5	1.14	8.4	x	249	
15	49	1.15	10.7	x	248	
16	48.5	1.13	11.5	x	244	
17	48	1.15	46.5	o	243	
18	48.5	1.14	47.8	o	244	
19	49	1.11	10.4	x	248	
20	48.5	1.13	9.9	x	246	

Polaridade negativa					
x = contornamento			o = não contornamento		
20 ensaios	Tensão por andar (5 andares)	Tf	T2/Tc	Contornamento	kV
1	72	1.11	3	x	-364
2	70	1.12	3.3	x	-355
3	68	1.11	3.7	x	-343
4	66	1.12	5.1	x	-334
5	64	1.1	6.2	x	-324
6	62	1.13	47.1	o	-315
7	64	1.11	47.4	o	-324
8	66	1.11	46.4	o	-334
9	68	1.11	5.5	x	-345
10	66	1.1	6.1	x	-328
11	64	1.11	6.5	x	-324
12	62	1.1	46.6	o	-313
13	64	1.12	47.4	o	-324
14	66	1.12	46.3	o	-334
15	68	1.11	46.7	o	-343
16	70	1.12	4.8	x	-353
17	68	1.1	4	x	-343
18	66	1.11	5.3	x	-334
19	64	1.11	6.3	x	-324
20	62	1.1	46.4	o	-313

Lightning impulse flashover voltage test (U50) - Open A and Open a					
Polaridade negativa			Pólo A		
x = contornamento			o = não contornamento		
20 ensaios	Tensão por andar (5 andares)	Tf	T2/Tc	Contornamento	kV
1	63	1.11	47.3	o	-319
2	63.5	1.12	10.2	x	-321
3	63	1.11	47.2	x	-319
4	62.5	1.09	6.9	x	-317
5	62	1.1	47.5	o	-315
6	62.5	1.11	47.2	o	-319
7	63	1.11	9.3	x	-319
8	62.5	1.12	46	o	-317
9	63	1.11	7.3	x	-319
10	62.5	1.11	46.1	o	-317
11	63	1.12	7.3	x	-319
12	62.5	1.12	46.2	o	-317
13	63	1.12	47.3	o	-315
14	63.5	1.11	7.4	x	-321
15	63	1.13	47.1	o	-319
16	63.5	1.1	8.7	x	-321
17	63	1.12	47.2	o	-319
18	63.5	1.11	10.1	x	-321
19	63	1.11	8.3	x	-319
20	62.5	1.12	46.5	o	-317

Polaridade positiva			Pólo A		
x = contornamento			o = não contornamento		
1	48.5	1.15	46.4	o	245
2	49	1.16	9.6	x	247
3	48.5	1.14	12.3	x	245
4	48	1.14	47.5	o	243
5	48.5	1.16	10	x	245
6	48	1.14	46.9	o	241
7	48.5	1.15	46.4	o	245
8	49	1.14	47.7	o	247
9	49.5	1.13	8.7	x	250
10	49	1.15	47.6	o	247
11	49.5	1.14	8.1	x	250
12	49	1.15	47.7	o	247
13	49.5	1.13	8.2	x	250
14	49	1.13	47.7	o	247
15	49.5	1.13	8.3	x	250
16	49	1.16	47.7	o	247
17	49.5	1.15	9.1	x	250
18	49	1.13	7.8	x	247
19	48.5	1.15	46.4	o	245
20	49	1.18	9.4	x	247
Polaridade positiva			Pólo a		
x = contornamento			o = não contornamento		
1	47.5	1.13	48.2	o	239
2	48	1.16	47.5	o	243
3	48.5	1.16	46.3	o	245
4	49	1.16	9.6	x	247
5	48.5	1.15	10.2	x	245
6	48	1.16	47.2	o	243
7	48.5	1.13	46.5	o	245
8	49	1.16	47.7	o	247
9	49.5	1.15	46.2	o	245
10	50	1.14	6.8	x	252
11	49.5	1.14	9.8	x	250
12	49	1.18	10.4	x	247
13	48.5	1.15	46.4	o	245
14	49	1.16	47.7	o	247
15	49.5	1.13	9.5	x	250
16	49	1.13	10.2	x	247
17	48.5	1.13	46.3	o	245
18	49	1.15	10.2	x	247
19	48.5	1.16	46.3	o	245
20	49	1.1	47.9	o	247

Polaridade negativa		Pólo a			
x = contornamento		o = não contornamento			
1	80	1.1	2.6	x	-404
2	79.5	1.12	2.6	x	-402
3	79	1.12	2.7	x	-400
4	78.5	1.09	2.5	x	-396
5	78	1.11	2.8	x	-396
6	77.5	1.11	47.9	o	-391
7	78	1.12	3.3	x	-393
8	77.5	1.1	47.9	o	-391
9	78	1.13	47.2	o	-393
10	78.5	1.1	46.9	o	-398
11	79	1.11	3	x	-400
12	78.5	1.11	48.1	o	-396
13	79	1.1	47.7	o	-400
14	79.5	1.11	2.6	x	-402
15	79	1.11	2.9	x	-400
16	78.5	1.1	2.9	x	-396
17	78	1.11	47.4	o	-393
18	78.5	1.09	3.2	x	-396
19	78	1.09	47.2	o	-393
20	78.5	1.12	10.9	x	-398

Lightning impulse flashover voltage test (U50) Isolate - Open A and Open a					
Polaridade positiva			Pólo a		
x = contornamento			o = não contornamento		
20 ensaios	Tensão por andar (7 andares)	Tf	Tc	Contornamento	kV
1	49	1.21	48	o	338
2	49.5	1.24	8.8	x	343
3	49	1.21	10.3	x	338
4	48.5	1.21	9.8	x	334
5	48	1.23	48.9	o	332
6	48.5	1.21	48.5	o	336
7	49	1.21	48	o	338
8	49.5	1.23	47.9	o	343
9	50	1.21	9.7	x	345
10	49.5	1.21	13.9	x	341
11	49	1.21	48	o	338
12	49.5	1.24	14.2	x	343
13	49	1.21	8.9	x	338
14	48.5	1.21	19.7	x	334
15	48	1.21	48.8	o	332
16	48.5	1.21	48	o	334
17	49	1.21	47.9	o	338
18	49.5	1.21	49.1	o	341
19	50	1.21	8	x	345
20	49.5	1.21	7.2	x	343

Polaridade negativa			Pólo a		
x = contornamento			o = não contornamento		
1	62	1.19	47.6	o	-431
2	62.5	1.19	12.3	x	-436
3	62	1.18	48.6	o	-429
4	62.5	1.18	12.4	x	-434
5	62	1.19	12.4	x	-431
6	61.5	1.18	14.9	x	-427
7	61	1.18	47.7	o	-423
8	61.5	1.19	47.8	o	-427
9	62	1.18	48.6	o	-429
10	62.5	1.18	13.7	x	-434
11	62	1.19	10	x	-429
12	61.5	1.18	47.7	o	-427
13	62	1.21	47.7	o	-431
14	62.5	1.18	7.1	x	-434
15	62	1.18	48.6	o	-429
16	62.5	1.18	16.1	x	-434
17	62	1.18	8.3	x	-429
18	61.5	1.21	9.1	x	-427
19	61	1.19	47.7	o	-423
20	61.5	1.21	48.3	o	-429
Polaridade negativa			Pólo A		
x = contornamento			o = não contornamento		
1	61	1.18	12.7	x	-423
2	60.5	1.19	5.1	x	-421
3	60	1.19	6.4	x	-417
4	59.5	1.18	5.9	x	-412
5	59	1.21	5.9	x	-410
6	58.5	1.19	12.1	x	-406
7	58	1.18	9.1	x	-404
8	57.5	1.21	11.3	x	-400
9	57	1.18	48.5	o	-396
10	57.5	1.18	48.5	o	-398
11	58	1.18	47.9	o	-402
12	58.5	1.19	47.7	o	-406
13	58	1.19	9.3	x	-404
14	58.5	1.21	47.7	o	-406
15	59	1.21	47.6	o	-410
16	59.5	1.18	48.5	o	-412
17	60	1.19	48.5	o	-417
18	60.5	1.19	10.1	x	-421
19	60	1.19	6.1	x	-417
20	59.5	1.19	9.3	x	-417

Polaridade positiva			Pólo A		
x = contornamento			o = não contornamento		
1	48	1.21	48.7	o	332
2	48.5	1.21	47.8	o	334
3	49	1.23	47.9	o	338
4	49.5	1.21	19.4	x	341
5	49	1.23	48	o	338
6	49.5	1.21	49	o	341
7	50	1.21	8.9	x	345
8	49.5	1.23	10.1	x	343
9	49	1.21	11.6	x	338
10	48.5	1.21	11.3	x	334
11	48	1.23	48.8	o	332
12	48.5	1.21	14.5	x	334
13	48	1.21	16	x	332
14	47.5	1.21	49.1	o	328
15	48	1.23	13.3	x	332
16	47.5	1.21	13.7	x	328
17	47	1.19	13	x	324
18	46.5	1.18	49.3	o	319
19	47	1.21	49.2	o	324
20	47.5	1.23	47.9	o	330

Referências

- [1] D.A. Jones. Electrical engineering: the backbone of society. *Proceedings of the IEE: Science, Measurement and Technology*.
- [2] Barry Brusso Baldwin Bridger. A brief history of metal-clad switchgear. *IEEE Industry Applications Magazine* (Volume: 20, Issue: 4, July-Aug. 2014), 06 June 2014.
- [3] Dragana Marković. The second industrial revolution. consultado em 9 de dezembro de 2007.
- [4] British pattern gb 20069 improvements in apparatus for controlling the application or use of electric currents of high tension and great quantity in 1893. *espacenet.com*.
- [5] Lin Jiming et al. Transient characteristics of 1 100 kv circuit-breakers. International Symposium on International Standards for Ultra High Voltage.
- [6] Allgemeine elektricitäts-gesellschaft (ed) aeg hilfsbuch für elektrische licht- und kraftanlagen 6th ed., 1953. (German).
- [7] Switzerland : Abb breaks new ground with environment friendly high-voltage circuit breaker. Retrieved 9 July 2013.
- [8] *The History of Electric Wires and Cables*. 1983.
- [9] Frederico Miguel Sousa Horta. Desenvolvimento e otimização de seccionadores em redes mt. Tese de mestrado, FEUP, 2014.
- [10] W. S. Zaengl E.Kuffel e J. Kuffel. *High-Voltage Engineering - Fundamentals*, 2^aed. Butterworth - Heinemann, 2000. URL: <https://books.google.pt/books?id=CLF5ugAACAJ>.
- [11] C L Wadhwa. *High Voltage Engineering*. 2012 - 3rd Edition.
- [12] John Kuffel e Peter Kuffel. *High voltage engineering fundamentals*. Newnes, 2000.
- [13] Motukuru S Naidu. *High voltage engineering*. Tata McGraw-Hill Education, 2013.
- [14] *Switchgear and Control Handbook 3rd Ed*. McGraw Hill, New York 1997.
- [15] Olle Ingemar Elgerd. Electric energy systems theory: an introduction. 1982.
- [16] Abdelhay A Sallam e Om P Malik. *Electric distribution systems*, volume 68. John Wiley & Sons, 2011.
- [17] Gang Lu, Liang Zhang, Hongda Zhang, Gongyu Lan, Yang Liu, Ou Xu, e Zhenxi Su. Experimental study on the insulating property of the gas substituting sf6 in gas insulated switchgear. *DEStech Transactions on Computer Science and Engineering*, (icte), 2016.

- [18] F.H. Kreuger. *Industrial High Voltage*. Número vol. 2 em *Industrial High Voltage*. Delft University Press, 1992. URL: <https://books.google.pt/books?id=z3xoPgAACAAJ>.
- [19] Standard metal-clad switchgear. IEEE Std C37.20.2, 1999.
- [20] Definitions for power switchgear. IEEE Std C37.100, 1992.
- [21] Metal-clad vs metal-enclosed. ELECTRICAL ENGINEERS AND MASTER ELECTRICI-ANS PORTAL, November 4 2008. Retrieved June 28, 2016.
- [22] Norme cei 60265-1 interrupteurs pour tension assignée supérieure à 1 kv et inférieure à 52 kv. Archived September 30, 2007. in French.
- [23] En 60439 part 1 table 6a. IEC Standard.
- [24] D Koch. Sf6 properties, and use in mv and hv switchgear. *Cahier technique*, (188), 2003.
- [25] Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions - part 1: Definitions, information and general principles, 2008.
- [26] Norme cei 60265-2 interrupteurs pour tension assignée supérieure à 52 kv archived, September 30 2007. in French.
- [27] <https://www.energy.siemens.com/cms/00000013/aune/Documents/MediumMarch> 18 2009. Archived.
- [28] EFACEC. *Aparelhagem de Alta e Média Tensão*.
- [29] Dietmar Gentsch, Christof Humpert, e Till Ruemenapp. Low-voltage, medium-voltage or high-voltage switchgear assembly with at least one moveable contact, Junho 7 2010. US Patent App. 12/795,093.
- [30] WMM Menheere e B Noordhuis. Safety and reliability of medium voltage switchgear with solid insulation of present day and future design. Em *Distribution Switchgear, 1990., Third International Conference on Future Trends in*, páginas 65–69. IET, 1990.
- [31] Christian M Franck. Hvdv circuit breakers: A review identifying future research needs. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26(2):998–1007, 2011.
- [32] Edward W Kalkstein, Richard L Doughty, Alfred E Paullin, James M Jackson, e Jerry L Ryner. Safety benefits of arc-resistant metalclad medium-voltage switchgear. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 31(6):1402–1411, 1995.
- [33] Vítor Filipe Correia de Sousa. Comportamento dielétrico dos equipamentos para trabalhos em tensão (tet) e seu controlo laboratorial. Tese de mestrado, FEUP, 2015.
- [34] Fábio Renato Lopes Branco. Otimização de procedimentos para o ensaio de cabos isolados de at e mt. Tese de mestrado, FEUP, 2014.
- [35] Ana Leonor Tavares Madureira. Análise dielétrica de um transformador de potência. Tese de mestrado, FEUP, 2014.
- [36] José Pedro Martinho Queirós. Análise comparativa do comportamento dielétrico dos isoladores compósitos com isoladores em materiais convencionais. Tese de mestrado, FEUP, 2013.

- [37] J.; Soares. N. Queirós. Memória descritiva do laboratório de alta tensão - aspetos construtivos, coordenação e operação, 2013.
- [38] M Binnendijk, GC Schoonenberg, e AJW Lammers. The prevention and control of internal arcs in medium-voltage switchgear. 1997.
- [39] Claude Kane, Igor Blokhintsev, e Alexander Golubev. Measurement and analysis of partial discharge in switchgear. Em *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, 2005. Proceedings*, páginas 203–210. IEEE, 2005.
- [40] Elin Fjeld, Svein Thore Hagen, Thomas Oyvang, Knut Vaagsaether, Pål Skryten, Ole Granhaug, T-R Bjørtuft, e Silvio Stangherlin. Small scale arc fault testing of medium voltage switchgear. 2013.
- [41] John Drummond Craggs e John M Meek. High voltage laboratory technique. 1954.
- [42] High voltage test techniques - part 1: General definitions and test requirements, 2010.
- [43] A. Machado e Moura. Apontamentos de técnicas da alta tensão.
- [44] N. Hyltén-Cavallius. *High Voltage Laboratory Planning*. Haefely, 1986. URL: <https://books.google.pt/books?id=CLF5ugAACAAJ>.
- [45] Nuno Miguel Almeida Soares. Inspeções periódicas em equipamento para trabalhos em tensão (tet): Ensaio dielétricos. Tese de mestrado, FEUP, 2013.
- [46] Voltage measurement by means of standard air gaps, 2002.
- [47] High-voltage switchgear and controlgear - part 1: Common specifications for alternating current switchgear and controlgear, 2017.
- [48] Common specifications for high-voltage switchgear and controlgear standards, 1996.

